

WANESKA PATRÍCIA PEREIRA ARAÚJO

**METODOLOGIA *FMEA-FUZZY* APLICADA À
GESTÃO DE INDICADORES DE CONTINUIDADE
INDIVIDUAIS DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA**

**FLORIANÓPOLIS
2008**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**METODOLOGIA *FMEA-FUZZY* APLICADA À
GESTÃO DE INDICADORES DE CONTINUIDADE
INDIVIDUAIS DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Elétrica.

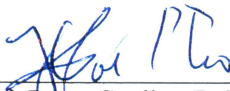
WANESKA PATRÍCIA PEREIRA ARAÚJO

Florianópolis, dezembro de 2008.

METODOLOGIA *FMEA-FUZZY* APLICADA À GESTÃO DE INDICADORES DE CONTINUIDADE INDIVIDUAIS DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Waneska Patrícia Pereira Araújo

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Sistemas de Energia Elétrica*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina’.

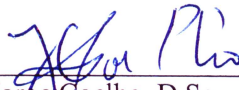


Prof. Jorge Coelho, D.Sc.
Orientador




Prof.ª Katia Campos de Almeida, Ph.D.
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

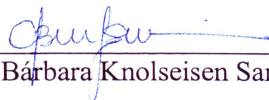
Banca Examinadora:



Prof. Jorge Coelho, D.Sc.
Presidente



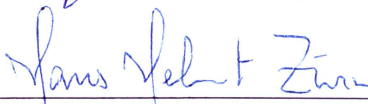
Prof.ª Silvia Modesto Nassar, D.Eng.
Co-Orientadora



Prof.ª Ana Bárbara Knolseisen Sambaqui, D.Eng.



Prof.ª Jacqueline Gisèle Rolim, D.Eng.



Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.

*Aos meus pais,
pelo amor incondicional.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, *Professor Jorge Coelho*, e minha co-orientadora, *Professora Silvia M. Nassar*, pela confiança e apoio no decorrer deste trabalho.

Aos professores do mestrado, em especial para os professores do LabPlan, *Celso de Brasil Camargo*, *Edson Luiz da Silva*, *Ildemar Cassana Decker* e *Raimundo C. Ghizoni Teive*.

Aos amigos do mestrado: *Diego Brancher*, *Fábio Brum*, *Leonardo Cavalcanti*, *Moises Santos* e *Vitor Matos*. Quero agradecer em especial ao meu amigo *Diego Issicaba* que nos momentos difíceis me deu bastante apoio.

Aos amigos do LabPlan, em especial a *Cristhine Cechinel*, *Gelson Brigatto*, *M. Beatriz Pereira*, *Maurício Sperandio*, *Raquel Sabóia* e *Richie Guder*, pelos momentos de descontração e troca de conhecimento.

A nossa querida secretária *Marina Ubeda*, sempre disposta a nos ajudar.

A toda equipe do LEA/INE que me ajudou com o progresso desta dissertação, em especial *Cláudio Flores* e *Beatriz Wilges*.

Aos meus pais, *Waldir Pereira da Silva (in memorian)* e *Maria Aneida Araújo da Silva*, pelo carinho e apoio incondicional durante todos os momentos da minha vida. Às minhas irmãs, *Patriciane*, *Paula* e *Waléria*, e ao meu irmão *Waldir Júnior*, pela amizade e apoio.

Ao meu namorado, *Leonardo Vitor Araújo Cavalcanti*, pelo carinho, força e compreensão principalmente na etapa final desta dissertação.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

METODOLOGIA *FMEA-FUZZY* APLICADA À GESTÃO DE INDICADORES DE CONTINUIDADE INDIVIDUAIS DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Waneska Patrícia Pereira Araújo

Dezembro/ 2008

Orientador: Jorge Coelho, D.Sc.
Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.
Palavras-chave: Indicadores de Continuidade Individuais de Energia, Gestão, FMEA, Risco e Lógica *Fuzzy*.
Número de Páginas: 112.

O produto energia elétrica tornou-se imprescindível para a nossa sociedade, sendo necessário tanto para o bem estar da população, como para o desenvolvimento econômico do país. Desta forma, esta mesma **sociedade** vem pressionando o setor elétrico para a manutenção da continuidade do serviço prestado, em função dos seus impactos na **sociedade**. Uma das evidências marcantes deste fenômeno no setor são as metas estipuladas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aos indicadores individuais de energia como DIC (Duração de Interrupção por Unidade Consumidora) e FIC (Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora), que mensuram a “continuidade” da prestação de serviço de energia para cada consumidor. Em virtude disso, a presente dissertação aborda o desenvolvimento de uma metodologia para apoiar a gestão desses indicadores, na qual foram utilizadas a metodologia *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) e a técnica de inteligência artificial Lógica *Fuzzy*. A metodologia proposta diz respeito à classificação de falhas, indicando quais ações preventivas devem ser realizadas pelo gestor de forma a melhorar as condições operacionais do sistema de distribuição de energia elétrica. As melhorias na qualidade do serviço prestado permitem uma maior continuidade do fornecimento e melhora os valores dos indicadores de uma concessionária DIC e FIC perante a ANEEL, sendo que nas aplicações efetuadas foram utilizados dados de modos de falhas e de indicadores de uma concessionária brasileira. Para validação da metodologia foi realizado um estudo comparativo entre a metodologia FMEA clássica e a metodologia desenvolvida *FMEA-FUZZY* e os resultados obtidos mostraram ganhos significativos na classificação do risco em relação à metodologia FMEA clássica e a viabilidade para aplicações em sistemas reais de distribuição de energia elétrica.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master (Doctor) in Electrical Engineering.

A FUZZY-FMEA METHODOLOGY APPLIED TO THE MANAGEMENT OF INDIVIDUAL CONTINUITY INDICES: DIC AND FIC

Waneska Patrícia Pereira Araújo

December /2008

Advisor:	Jorge Coelho, D.Sc.
Area of Concentration:	Electrical Energy Systems.
Keywords:	Individual continuity indices; Failure, FMEA, Risk and Fuzzy
Number of Pages:	logic. 112.

The electrical energy service has become essential for our society. This service is used to develop our economy and to improve quality of life. As consequence, our society has been demanding higher levels of quality of service. In Brazil, the regulatory agency ANEEL (National Government Agency for Electricity) is the entity responsible to define the targets related to the quality of service for the utilities. These targets are evaluated through indices, namely DIC (duration of interruption in each consumer unit) and FIC (frequency of interruption in each consumer unit). This dissertation presents the development of a methodology that supports the preventive maintenance of equipments in order to improve these indices. For this accomplishment, the utility equipment is ranked according to its risk of failure using specific rules. These rules were developed by utilizing Fuzzy Logic and FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) concepts.

The proposed approach was validated using a database provided by a Brazilian utility. In addition, cross-validation and comparative analyses with the traditional FMEA methodology were performed. The results pointed out that the proposed approach improves the traditional FMEA methodology and its feasibility for any electrical energy distribution utility.

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
1.1.	Contextualização.....	1
1.2.	Justificativa	5
1.3.	Objetivos.....	7
1.3.1.	Objetivo Geral	7
1.3.2.	Objetivos Específicos	7
1.4.	Estrutura da Dissertação	8
2.	Análise dos Modos e Efeitos de Falha (FMEA)	9
2.1.	Histórico	9
2.2.	Visão Geral da FMEA	11
2.2.1.	Conceitos Básicos de Análises de Falhas.....	13
2.3.	Características.....	14
2.4.	Tipos de FMEA	14
2.4.1.	FMEA de Serviço.....	15
2.5.	Princípio de Funcionamento	16
2.5.1.	Passos para Conduzir a FMEA.....	16
2.6.	Número de Prioridade de Risco (RPN)	19
2.6.1.	Severidade de Falha	20
2.6.2.	Ocorrência de Falha	21
2.6.3.	Detecção de Falha	22
2.6.4.	Ordenação dos Índices do RPN.....	23
2.6.5.	Deficiências do Índice RPN	25
2.7.	Principais Aplicações.....	28
2.8.	Benefícios da FMEA para as Empresas.....	29
2.9.	Limitações da FMEA.....	30
2.10.	Considerações Finais.....	31
3.	Lógica <i>Fuzzy</i>	32
3.1.	Visão Geral	32
3.2.	Princípio da Extensão de Zadeh	34
3.3.	Conjuntos <i>Fuzzy</i>	35
3.3.1.	Funções de Pertinência.....	37
3.3.2.	Classificação de Conjuntos	39
3.3.3.	Conjuntos $\alpha - cut$	41
3.4.	Número <i>Fuzzy</i>	43
3.5.	Operações Aritméticas.....	45
3.5.1.	Algoritmo DSW	46
3.5.2.	Aritmética de Intervalos	47
3.6.	Conceitos Básicos de Lógica <i>Fuzzy</i>	49
3.6.1.	<i>Fuzzificação</i>	49
3.6.2.	<i>Desfuzzificação</i>	50
3.7.	Aplicação da Lógica <i>Fuzzy</i> à Metodologia Proposta.....	50
3.8.	Considerações Finais	51
4.	Metodologia <i>FMEA-FUZZY</i> Aplicada a Gestão dos Indicadores Individuais de Energia: DIC e FIC	52

4.1.	Introdução	52
4.2.	Revisão sobre Aplicações de FMEA e Lógica <i>Fuzzy</i>	53
4.3.	Descrição da Metodologia Proposta <i>FMEA-FUZZY</i>	60
4.3.1.	Modelagem FMEA.....	60
4.3.2.	Modelagem <i>Fuzzy</i>	64
4.3.3.	Modelagem <i>FMEA-FUZZY</i>	67
4.4.	Considerações Finais	70
5.	Estudo de Caso e Resultados	71
5.1.	Introdução	71
5.2.	Descrição da Base de Dados	72
5.3.	Exemplo Hipotético da Metodologia <i>FMEA-FUZZY</i>	73
5.4.	Estudo de Caso	80
5.4.1.	Análise FMEA por Modos de Falha em uma Visão Micro por Equipamento	81
5.4.2.	Análise de FMEA por Equipamento em uma Visão Macro.....	84
5.4.3.	Análise de Falhas Total por Equipamentos com Dados Simulados	88
5.4.4.	Estudo Comparativo entre as Metodologias FMEA Clássica e FMEA-FUZZY 91	
5.5.	Considerações Finais	94
6.	Considerações Finais	96
6.1.	Conclusões	96
6.2.	Sugestões para Trabalhos Futuros	99
I.	Apêndice – Resultados.....	100
I.1.	Resultado Completo da Primeira Parte do Estudo de Caso	100
I.2.	Risco Total por Modo de Falha	102
I.3.	Risco e Dados dos Parâmetros de Entrada da Seção 5.4.4	103
	Anexo A: Conceitos e Cálculo dos Indicadores Individuais de Continuidade	105
	Referências Bibliográficas	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tabela do Formulário FMEA. Adaptação: STAMATIS, 1995.....	17
Figura 2.2 – Análise FMEA, com destaque para os índices S, O, D e RPN.....	18
Figura 2.3 – Escala do RPN com o número de ocorrências de cada número. Fonte: Bowles, 2003.....	27
Figura 3.1 – Função de pertinência de um número clássico com valor exatamente 2.....	35
Figura 3.2 – Função de pertinência de um número <i>fuzzy</i> com valor aproximadamente 2.....	35
Figura 3.3 – Características de um conjunto <i>fuzzy</i> . Adaptação: KISHK e AL-HAJJ, 2000.	38
Figura 3.4 – Conjunto <i>fuzzy</i> normal e convexo. Fonte: ROSS, 2004.	40
Figura 3.5 – Conjunto <i>fuzzy</i> normal e não-convexo. Fonte: ROSS, 2004.	40
Figura 3.6 – Função pertinência do conjunto A^α . Adaptação: RENTERÍA, 2006.....	42
Figura 3.7 – Número <i>fuzzy</i> triangular	44
Figura 3.8 – Número <i>fuzzy</i> trapezoidal	44
Figura 3.9 – Modelagem <i>Fuzzy</i>	51
Figura 4.1 – Função de pertinência para entrada Potência Não-Suprida (kVA).	65
Figura 4.2 – Função de pertinência para entrada FIC (%).....	66
Figura 4.3 – Função de pertinência para entrada DIC (%)	66
Figura.4.4 – Fluxograma da estimação do risco (RPN) e ordenação de equipamentos....	69
Figura 5.1 – Entrada Potência Não-Suprida para o índice Severidade	74
Figura 5.2 – Entrada FIC (%) para o índice Ocorrência	74
Figura 5.3 – Entrada DIC (%) para o índice Detecção	75
Figura 5.4 – Função de Pertinência do Risco Resultante.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Procedimento de Critério de Severidade. Adaptação: STAMATIS, 1995. .	21
Tabela 2.2 – Procedimento de Critério de Ocorrência. Adaptação: STAMATIS, 1995. .	22
Tabela 2.3 – Procedimento de Critério de Detecção. Adaptação: STAMATIS 1995.	23
Tabela 2.4 - Análise do índice RPN.....	25
Tabela 2.5 – Combinações do RPN 64. Adaptação: BOWLES, 2003	27
Tabela 3.1 – Número <i>fuzzy</i> triangular e trapezoidal	44
Tabela 4.1 – Escala para o índice Severidade.....	62
Tabela 4.2 - Escala para o índice Ocorrência.	63
Tabela 4.3 – Escala para o índice Detecção.....	64
Tabela 5.1 – Valores de entrada.....	73
Tabela 5.2 – Entradas FIC e DIC percentuais.....	73
Tabela 5.3 – Par [risco, pertinência].	75
Tabela 5.4 – Combinações dos pares de [risco, pertinência] encontrados.....	76
Tabela 5.5 – Limites do intervalo para o risco da primeira combinação.....	77
Tabela 5.6 – Limites do intervalo para o risco da segunda combinação.	78
Tabela 5.7 – Análise dos modos de falha por equipamento e o risco total associado.	83
Tabela 5.8 – Análise de uma visão macro por equipamento Trimestre_1.....	85
Tabela 5.9 – Análise de uma visão macro por equipamento Trimestre_2.....	86
Tabela 5.10 – Análise de uma visão macro por equipamento Trimestre_3.....	87
Tabela 5.11 – Análise de uma visão macro por equipamento Trimestre_4.....	88
Tabela 5.12 – Visão macro do risco total por equipamento com falhas mais críticas, Trimestre_3 Simulado.....	89
Tabela 5.13 – Visão macro do risco total por equipamento com falhas mais críticas, Trimestre_4 Simulado.....	90
Tabela 5.14 – Resultado do risco para as metodologias FMEA clássica e FMEA-FUZZY no Trimestre_3 Simulado.....	92
Tabela 5.15 – Comparação da ordenação com as metodologias FMEA clássica e FMEA- FUZZY.....	93
Tabela I.1 – Análise dos modos de falha por equipamento (Visão Micro).	100
Tabela I.2 – Risco total por modo de falha.	102
Tabela I.3 – Risco total por Equipamento.	103
Tabela I.4 – Risco total por Equipamento.	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Operações de conjuntos de intervalos. Fonte: ROSS (2004).....	47
----------------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS

DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DRP	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária
DRC	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica
ICC	Índice de Unidades Consumidoras com Tensão Crítica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>
FMECA	<i>Failure Mode Effect and Criticality Analysis</i>
RPN	<i>Risk Priority Number</i>
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
ETA	<i>Event Tree Analysis</i>
FRPN	<i>Fuzzy Risk Priority Number</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i>
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i>
SOM	<i>Smallest of Maximum</i>

1.INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma breve descrição do problema relacionado ao comprometimento das concessionárias de distribuição de energia elétrica junto a seus consumidores na qualidade do fornecimento de energia elétrica. Isto se deve ao fato de possíveis ultrapassagens de metas, pelas concessionárias, de indicadores individuais de energia, afetarem diretamente o consumidor que é o usuário final desse produto. Em seguida é feita uma descrição dos objetivos gerais e específicos desta dissertação.

1.1. Contextualização

A energia elétrica é um dos recursos básicos para o desenvolvimento da humanidade. Ela está presente nas atividades de trabalho, lazer, saúde e segurança. Assim, tornou-se um elemento vital para promover o crescimento do país e para que a sociedade possa realizar suas ações diárias.

Para obter êxito na realização dessas ações, espera-se que os sistemas de distribuição de energia elétrica sejam confiáveis e de qualidade, ou seja, que o fornecimento de energia aos consumidores seja contínuo e sob níveis de tensão adequados ao estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), conforme regulamentação específica.

Porém, os sistemas que realizam a prestação desse serviço não estão imunes à ocorrência de falhas durante sua operação. Essas falhas, dependendo da intensidade, podem causar grandes transtornos aos consumidores de acordo com o seu ramo de atividade, prejuízos econômicos à empresa concessionária e, até mesmo, relacionados à segurança de vida humana.

Segundo Rausand e Oien (1996), a falha é definida como o término da habilidade de um item para o desempenho de uma requerida função e representa um conceito fundamental para a análise de confiabilidade de um sistema. As falhas são freqüentemente classificadas dentro de modos de falhas. Um modo de falha é a descrição de uma falta, ou seja, como se pode observar a falta. A confiabilidade pode ser definida como a probabilidade de um determinado sistema desempenhar as funções para as quais foram planejados sem falha em um determinado instante ou intervalo de tempo (HELMAN e ANDERY, 1995).

A qualidade de uma análise de confiabilidade está diretamente relacionada à habilidade que o analista possui em identificar todas as funções desempenhadas pelos componentes e as possíveis ocorrências de falhas potenciais.

Uma das técnicas qualitativas utilizadas para analisar falhas na prestação de serviços de vários ramos da indústria é a ferramenta FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*). Essa técnica vem sendo utilizada com sucesso pela indústria automobilística há alguns anos, por meio da norma americana QS-9000 (HOYLE, 1997), como forma de analisar e prevenir a ocorrência de defeitos nos seus processos e projetos. (ROTONDARO, 2002)

A QS-9000 (*Quality Systems Requirements*) é um sistema de qualidade que foi idealizado por um grupo da indústria automotiva composto por: *Chrysler, Ford e General Motors*, conhecido como “*Big Three*”. Eles desenvolveram esse sistema baseado na estrutura da ISO 9000 (HOYLE, 2005). O objetivo principal foi padronizar os sistemas de qualidade e manuais fundamentais, assim como ferramentas de avaliação de fornecedores. A QS-9000 utiliza a metodologia FMEA como um sistema para aprovação de peças de automóveis (SILVA *et al.*, 1997).

Em relação à avaliação das falhas do serviço prestado pelas empresas do setor de energia elétrica, há uma cobrança, cada vez mais rigorosa, de qualidade por parte do órgão regulador brasileiro e dos consumidores com base em indicadores de continuidade, estabelecidos na regulamentação do setor.

Qualidade de energia está relacionada a um conjunto de alterações que podem ocorrer no desempenho do sistema de distribuição de energia elétrica. Os parâmetros de avaliação principais são: a conformidade, o atendimento ao consumidor e a continuidade. Assim, a qualidade de energia pode ser definida como qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência resultando em falha ou operação inadequada de equipamentos de consumidores. Essas alterações podem ocorrer em várias partes do sistema de distribuição de energia, seja nas instalações de consumidores ou na subestação e redes da concessionária (GUEDES *et al.*, 2006).

A continuidade de distribuição diz respeito ao grau de disponibilidade de energia elétrica fornecida ao consumidor. É importante que não haja interrupção no fornecimento de energia elétrica, pois isso pode afetar o cotidiano das pessoas causando grandes transtornos por comprometer serviços essenciais. Em caso de interrupção, esta deve durar o menor tempo possível e de preferência que seja informada ao consumidor com antecedência para que o mesmo possa estar prevenido.

Para que as concessionárias atendam aos requisitos de confiabilidade e qualidade no serviço, foi criado no Brasil um órgão regulador, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que visa assegurar os requisitos através de regulamentos e inspeções. A ANEEL foi criada em 1996, pela Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996. As resoluções de nº 024/2000 e nº 505/2001 estabelecem, respectivamente, as disposições relativas à continuidade da distribuição de energia elétrica as unidades consumidoras e as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente (ANEEL, 2004).

A ANEEL estipulou metas para os indicadores de continuidade, por meio da resolução 024/2000, em relação à frequência de ocorrência e duração da interrupção causada por falhas que o sistema de uma concessionária pode sofrer em um determinado mês, trimestre ou ano. Caso essa meta seja violada, são aplicadas penalidades pelo órgão regulador à concessionária. Deste modo, é realizado um controle sobre as concessionárias de distribuição por meio dos indicadores de continuidade. O objetivo é incentivar as concessionárias a evitarem a ocorrência de falhas por meio de dessas metas sob pena de

pagar multa. Os indicadores de continuidade, segundo resolução 024 em 27 de janeiro de 2000 (ANEEL, 2004), se dividem em: indicadores de continuidade de conjunto DEC ((Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e indicadores individuais DIC (Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora), DMIC (Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora) e FIC (Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora), no qual os primeiros são úteis ao órgão regulador para realizar a avaliação de concessionárias. Os últimos são úteis para o órgão regulador avaliar o atendimento de concessionárias em relação aos consumidores.

Segundo resolução específica, as concessionárias (desde janeiro de 2005) têm o dever de informar na fatura dos seus consumidores, os dados dos valores mensais de DIC, FIC e DMIC verificados na última apuração, ficando dispensada a obrigatoriedade das informações relativas aos indicadores DEC e FEC. Em caso de ultrapassagem de metas desses indicadores, ela deverá fazer o cálculo da compensação ao consumidor e efetuar o crédito do valor na fatura de energia elétrica no mês subsequente à apuração (ANEEL 2004). O anexo A fornece alguns conceitos e cálculo dos indicadores individuais que constituem o objeto dessa dissertação.

Além dos indicadores de continuidade, existem os indicadores de conformidade que monitoram a meta dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente. Segundo resolução 505, de 26 de novembro de 2001 (ANEEL, 2004), estes indicadores também se dividem em indicadores individuais DRC (Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica) e DRP (Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária) e indicador de conjunto ICC (Índice de Unidades Consumidoras com Tensão Crítica).

Como as concessionárias devem assegurar os requisitos de qualidade e confiabilidade exigidos para o bom funcionamento do seu sistema de distribuição, é necessário utilizar ferramentas de gestão para que seja possível avaliar os pontos críticos do mesmo, sendo que são considerados críticos os pontos que possuem risco potencial de ocorrer falhas. Com isso, podem-se realizar as mudanças necessárias para que essas

possíveis causas de falhas sejam eliminadas previamente, reduzindo a contribuição das mesmas para os indicadores de continuidade e conformidade.

1.2. Justificativa

Melhorias na qualidade de energia devem ser proporcionadas aos sistemas de distribuição de energia elétrica para atender o consumidor de forma eficiente. Nesse intuito, o órgão regulador prevê metas para os indicadores DIC e FIC que devem ser seguidas pelas empresas concessionárias como uma medida de garantia. Essas metas são renegociadas a cada revisão tarifária entre o órgão regulador e a concessionária, de acordo com o sistema da mesma, sendo que maiores detalhes sobre metas e revisão tarifária são fornecidas pelas resoluções 024/00 e 075/03¹. Em caso de infração de metas, a concessionária pode sofrer as penalidades previstas na resolução 318/98 da ANEEL (ANEEL, 2004), de forma que as concessionárias devem ter a preocupação de fazer uma gestão adequada da qualidade de seu serviço para não ultrapassar as metas e, evitar descontentamento dos consumidores e pagamento de multas à ANEEL.

Em virtude do exposto, é necessário fazer um levantamento e uma análise das causas, modos e efeitos das falhas de um sistema de distribuição para que a concessionária possa ter controle sobre as falhas ocorridas em um determinado período de tempo, e assim cumprir a meta estipulada. A análise de falhas permitirá também um auxílio à tomada de decisão por parte do gestor da concessionária, no qual poderão ser determinados os pontos críticos do sistema e, conseqüentemente, aumentar a confiabilidade naquele ponto. Com isso, ocorrerá uma diminuição na interrupção do fornecimento de energia, o que acarretará em benefícios tanto para o consumidor como para a concessionária.

Nesse intuito, foi desenvolvida nessa dissertação uma metodologia de apoio à gestão com relação aos indicadores individuais, denominada *FMEA-FUZZY*. Neste sistema de gestão é possível realizar uma estimativa de risco para saber quais

¹ Altera dispositivos da Resolução 024, de 27 de janeiro de 2000.

equipamentos podem contribuir na ultrapassagem de metas, ou seja, quais deles são identificados como um grande fator de risco a comprometer a energia fornecida aos consumidores. Isso é obtido por meio da priorização dos riscos resultantes da estimativa de risco. Esta metodologia servirá de suporte para um sistema de apoio à gestão de falhas em ambiente *web* que está em desenvolvimento pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em parceria com uma concessionária brasileira, por meio de projeto de pesquisa e desenvolvimento junto à ANEEL (ARAÚJO *et al.*, 2008; MAZZOLA *et al.*, 2008). A metodologia é avaliada em uma aplicação prática com dados fornecidos pela dita concessionária.

Assim, esta dissertação apresenta uma metodologia desenvolvida para apoiar a gestão dos indicadores de continuidade individuais DIC e FIC em relação às metas de uma concessionária brasileira. Não é objetivo da mesma, calcular os indicadores DIC e FIC, uma vez que, esses dados já são cotidianamente calculados e disponibilizados pela concessionária. Existem diversas metodologias que abordam o problema de gestão de falhas, dentre as quais pode-se destacar: FMECA (*Failure Mode Effect and Criticality Analysis*), FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), FTA (*Fault Tree Analysis*), ETA (*Event Tree Analysis*) e o Diagrama de Árvore ou Diagrama Sistemático. Para dar suporte a essas metodologias de gestão, pode-se utilizar técnicas de inteligência artificial como, por exemplo, lógica *fuzzy* e redes neurais.

Para o desenvolvimento da metodologia proposta optou-se pela utilização da metodologia FMEA, pois foi a que mais se adequou ao problema abordado, auxiliando na investigação e análise das causas de falhas que contribuem com o possível aumento dos indicadores de continuidade. Como o objetivo da metodologia é fornecer uma classificação dos equipamentos com maior ocorrência de falhas, para dar suporte à metodologia FMEA foi utilizada a lógica *fuzzy* que trata da incerteza das informações acerca das falhas para melhorar a classificação, já que considera um evento que pode estar em transição entre uma classe e outra. Neste sentido, contou-se com o auxílio de especialistas que trabalham na empresa, assim como de acadêmicos de Engenharia Elétrica e de Ciências da Computação, para auxiliar na definição de alguns parâmetros e escalas para estimar o risco associado a cada modo de falha.

A análise da FMEA é feita por meio da obtenção dos dados dos modos de falha dos equipamentos para realização de um estudo de priorização das falhas pela sua criticidade de forma a obter o conhecimento da natureza de sua ocorrência e, com isso, poder preveni-las. Assim, reduz-se a contribuição delas para o aumento de cada indicador específico.

A seguir são apresentados os objetivos da dissertação e a estrutura dos capítulos seguintes.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

O objetivo geral dessa dissertação é desenvolver uma metodologia para apoiar o gerenciamento das metas contratuais de desempenho dos indicadores de continuidade individuais, DIC e FIC, de uma concessionária do setor elétrico. A finalidade é beneficiar os consumidores com uma melhor qualidade de energia elétrica fornecida pela concessionária.

1.3.2. Objetivos Específicos

Outros objetivos mais específicos são listados a seguir:

- Avaliar o comportamento dos indicadores individuais de continuidade DIC e FIC dos consumidores de uma concessionária de energia brasileira;
- Analisar o impacto das falhas a esses indicadores DIC e FIC;
- Desenvolver uma metodologia para estimar o risco associado às falhas dos indicadores DIC e FIC;
- Realizar uma priorização dessas falhas para dar suporte à decisão do gestor com o fim de aperfeiçoar a utilização de recursos para a manutenção do sistema.

1.4. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está composta de seis capítulos descritos a seguir:

- **Capítulo 1:** apresenta uma contextualização sobre a problemática na qualidade do fornecimento de energia, seguida pela justificativa e pelos objetivos da dissertação;
- **Capítulo 2:** apresenta a metodologia FMEA por meio de uma abordagem geral;
- **Capítulo 3:** apresenta a lógica *fuzzy* abordando conceitos gerais, ressaltando aqueles conceitos que foram utilizados na metodologia *FMEA-FUZZY*;
- **Capítulo 4:** apresenta a metodologia proposta: *FMEA-FUZZY*, assim como os parâmetros que foram utilizados no desenvolvimento da mesma.
- **Capítulo 5:** apresenta os resultados encontrados na metodologia proposta, permitindo fazer uma análise acerca dos indicadores DIC e FIC por meio da análise de risco;
- **Capítulo 6:** apresenta as considerações finais do estudo realizado nesta dissertação, assim como os pontos observados.

Por fim, apresentam-se: o Apêndice I que contém tabelas extras dos resultados de estudo de caso (Capítulo 5) e o Anexo A que mostra conceitos e cálculos a respeito dos indicadores de continuidade individuais.

2. ANÁLISE DOS MODOS E EFEITOS DE FALHA (FMEA)

Um bom gerenciamento em processos e sistemas garante a execução do que foi planejado para atender as expectativas do consumidor em relação ao produto ou serviço. A FMEA permite uma avaliação sistemática e padronizada de falhas potenciais, fornecendo um critério de risco para priorizar as ações gerenciais a serem adotadas para atenuar o risco encontrado, pois permite a hierarquização de causa das falhas quanto a sua importância e risco. Estabelece parâmetros que orientam as medidas preventivas ou corretivas (HELMAN e ANDERY, 1995).

Este capítulo apresenta conceitos básicos da metodologia FMEA, a fim de familiarizar o leitor com o tema. Para isso, foi realizada uma breve revisão bibliográfica sobre o tema para uma abordagem geral, sendo que ao final é dado o enfoque da aplicação FMEA na metodologia proposta.

2.1. Histórico

A Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) foi desenvolvida pelas forças armadas dos Estados Unidos, por meio do Procedimento MIL-P-1629 em 9 de novembro de 1949 (DOD, 1980). Este procedimento militar foi intitulado de Procedimento de Análise dos Modos, Efeitos e Criticidade da Falha (FMECA) e tem como objetivo avaliar as falhas do sistema a fim de evitá-las. As falhas foram classificadas de acordo com seu impacto no sucesso da missão e na segurança de pessoa/equipamento (PENTTI e ATTE, 2002).

O procedimento militar MIL-P-1629 funcionou como um modelo para as normas militares MIL-STD-1629 e MIL-STD-1629A (DOD, 1980), as quais ilustram os procedimentos mais comumente utilizados pela metodologia FMEA. Depois surgiram outras normas para auxiliar a FMEA como, por exemplo, a IEC 60812 (IEC, 2006) intitulada de *Técnicas de análises para confiabilidade de sistemas – Procedimento para a análise dos modos e dos efeitos de falha (FMEA)* (PENTTI e ATTE, 2002).

A primeira aplicação formal do uso da FMEA foi realizada pela indústria aeroespacial (NASA) em 1963, com o intuito de propor uma metodologia de projeto que atendesse às necessidades de confiabilidade durante o programa APOLLO². O objetivo era aumentar a confiabilidade e garantir as exigências de segurança relacionada às falhas de todos os componentes e dos seus efeitos sobre os sistemas do programa espacial (PENTTI e ATTE, 2002).

A discussão acadêmica sobre FMEA originou-se por volta anos 60, no qual o estudo de falhas nos componentes foi estendido aos efeitos das falhas dos componentes nos sistemas dos quais faziam parte (COUTINHO, 1964 **apud** BARBOSA JUNIOR, 2007, p. 10). No final dos anos 60 e no início dos anos 70 diversas sociedades profissionais publicaram os procedimentos formais que executam a análise e a natureza genérica do método proliferou rapidamente a FMEA a diferentes áreas de aplicação.

No final dos anos 70 e início dos anos 80 as indústrias automotivas americanas começaram a aplicar formalmente a FMEA no desenvolvimento de seus novos produtos e processos, sendo a *Ford Motor Company* a pioneira na utilização da FMEA em 1977, no intuito de aumentar a confiabilidade de sua produção. Mais tarde, em 1988, publicou um manual de aplicação deste método à engenharia automobilística intitulado *Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMECA) and for Manufacturing and Assembly Processes (Process FMECA) Instruction Manual* (COSTA, 2007).

Com isso, um grupo formado pelas montadoras de automóveis: *Chrysler Corporation*, *Ford Motor Company* e a *General Motors* desenvolveu a norma QS-9000

² O Programa Apollo foi um conjunto de missões espaciais coordenadas pela NASA entre as décadas de 60 e 70, com o objetivo de colocar o homem na lua.

(HOYLE, 1997) com o objetivo de padronizar a qualidade no fornecimento de peças, obterem uma contínua melhoria de seus produtos e serviços, prevenção de defeitos, redução de desperdícios e custos, entre outros. Assim, a QS-9000 é uma analogia automotiva da norma ISO 9000 (HOYLE, 2005), onde como padrão os fornecedores automotivos QS-9000 necessitam utilizar previamente a FMEA no processo de planejamento da qualidade e no desenvolvimento do plano de controle de qualidade. O esforço feito por uma força tarefa levou à criação de um padrão amplamente usado na indústria, conhecido como *Surface Vehicle Recommended Practice: SAE J-1739* (BOWLES, 2003), sendo este padrão distribuído pela Sociedade de Engenharia Automotiva (SAE) em 1994 (PENTTI e ATTE, 2002).

Desde então, a FMEA tem sido largamente utilizada como uma importante ferramenta na análise de confiabilidade e segurança de sistemas, projetos, processos e serviços nas mais diversas áreas.

2.2. Visão Geral da FMEA

Análise dos Modos e Efeitos de Falhas (FMEA) é uma metodologia de engenharia que realiza uma análise *bottom-up*, ou seja, de baixo para cima. Essa metodologia auxilia na identificação de falhas potenciais e/ou existentes em um sistema, produto, processo ou serviço, e na identificação de processos de risco. Assim, a FMEA provê um método sistemático de examinar todas as maneiras que a falha pode ocorrer antes de atingir o cliente e implementar ações para aumentar a confiabilidade. Para cada falha é realizada uma estimativa do efeito total da severidade, da ocorrência e da detecção associada em cada sistema analisado (STAMATIS, 1995).

A análise das falhas pode ser realizada por meio de análise qualitativa ou por meio de análise quantitativa:

- 1) Análise Qualitativa - utiliza dados históricos pelos quais pode ser realizada uma análise de dados de ocorrências similares para serviços similares. Pode também

ser aplicada em dados da garantia, de queixas do cliente, e de toda informação apropriada disponível para definir as falhas.

- 2) Análise Quantitativa - utiliza dados de taxa de falhas para calcular números de criticidade. Faz uso de inferências estatísticas, modelagem matemática, simulações e da engenharia da confiabilidade para identificar e definir falhas.

A falha é classificada de acordo com a criticidade de seus efeitos e de sua probabilidade de ocorrência, sendo o ponto crítico focado a partir da causa, raciocinando na direção do efeito. A partir deste ponto, pode-se determinar por meio de análise do modo de falha, o efeito de cada falha e identificar os pontos críticos. Deste modo, tem-se a análise dos modos, efeitos e criticidade da falha (FMECA) que é resultado de duas metodologias:

- Failure Mode and Effect Analysis (FMEA);
- Criticality Analysis (CA).

A análise de criticidade é realizada por meio do índice RPN (*Risk Priority Number*), que estima o risco relacionado às falhas ocorridas, e é obtido pelo produto de outros três índices: Severidade, Ocorrência e Detecção. Esses índices serão descritos formalmente na Seção 2.6 (COSTA, 2007).

Diante do exposto, ao realizar uma análise FMEA/FMECA deve-se (STAMATIS, 1995):

- Identificar os modos de falhas conhecidos e potenciais;
- Identificar as causas e os efeitos de cada modo de falha;
- Priorizar os modos de falha identificados de acordo com o Número de Prioridade de Risco (RPN).

É importante manter a FMEA atualizada. Isso deve ser feito quando:

- Um novo ciclo é iniciado (produto novo/processo);
- Mudanças são realizadas às condições de funcionamento;

- Uma mudança é realizada no projeto;
- Novos regulamentos são instituídos;
- O cliente retornar a indicação de um problema.

2.2.1. Conceitos Básicos de Análises de Falhas

Nesta Seção são apresentados alguns conceitos básicos que compõem a metodologia FMEA.

Modo de falha: é a descrição da falha, ou seja, como esta pode ser observada. Pode-se citar como exemplos de modos de falha: curto-circuito, corrosão ou deformação elétrica. Um modo de falha em um componente também pode conduzir a um modo de falha em outro componente (RAUSAND e OIEN, 1996).

Efeitos de falha: o efeito é a consequência da falha no processo, produto, operação, consumidor e órgãos governamentais (por exemplo, ANEEL). Pode-se citar como exemplos de efeitos de falha: desempenho, ruído ou até mesmo ferimento causado a um usuário. A cada efeito pode ser relacionado uma escala de Severidade de 1 (nenhum perigo) a 10 (perigoso). Para identificar esses efeitos potenciais, outras ocorrências devem ser observadas/correlacionadas:

- Dados históricos;
- Ocorrências similares ou FMEAs passadas;
- Reclamações dos consumidores;
- Dados de confiabilidade;
- Viabilidade de estudos.

Causas de falhas: a deficiência de um serviço ou produto que resulta em um modo de falha respectivo. Pode-se citar como exemplos de causas: algoritmos incorretos, tensão excessiva ou condições de funcionamento impróprias. Todas as causas potenciais para um modo de falha devem ser identificadas e documentadas.

2.3. Características

A FMEA possui como característica grande capacidade de organizar informações, como (COSTA, 2007):

- Permitir a hierarquização de modos de falha potencial e existente e, com isso, estabelecer um sistema de prioridades de investimento de melhorias, desenvolvimento, análises, testes e validação;
- Apresentar um formato de análise simples, que estimula a discretização eficaz dos modos de falha e estimula o surgimento de ações de redução de risco possíveis;
- Representar uma referência para análises futuras, pois gera um histórico de dados de erros ocorridos, levando ao desenvolvimento de técnicas avançadas de projeto e, com isso, incentivando a necessidade constante de desenvolvimento.

2.4. Tipos de FMEA

Segundo STAMATIS (1995), os tipos de FMEA podem ser classificados, de acordo com sua aplicação, em:

- FMEA de Sistemas: usado para analisar sistemas no início da concepção e estágio de projeto;
- FMEA de Projeto: usado para analisar projetos antes que virem produtos. O foco se concentra em modos de falha causados por deficiências de projeto;
- FMEA de Processo: usado para analisar os processos de produção;
- FMEA de Serviço: usado para analisar serviços antes que cheguem ao consumidor.

No presente estudo foi realizada uma análise para avaliar o serviço de fornecimento de energia elétrica aos consumidores de uma concessionária brasileira, por esta razão é dada uma breve introdução sobre FMEA de Serviço a seguir.

2.4.1. FMEA de Serviço

A FMEA de Serviço é um processo dinâmico que envolve a aplicação de várias tecnologias e métodos para produzir uma saída eficaz do processo, obtendo como resultado um serviço livre de defeitos. O objetivo é definir, demonstrar e maximizar soluções em resposta à qualidade, à confiabilidade, à sustentabilidade, ao custo e à produtividade como definidas pelas especificações do serviço e pelo cliente (STAMATIS, 1995).

A FMEA de Serviço é realizada basicamente por meio do desenvolvimento do serviço (produto), da participação ativa do cliente, da pesquisa, da garantia de qualidade, do marketing, das operações, ou da combinação de todas estas entidades.

Na realização da FMEA devem-se responder perguntas usuais para determinar a potencialidade inerente de elementos específicos do serviço como: “Este serviço pode ser fornecido?” e “Como a empresa pode fornecer este serviço?”.

Um serviço FMEA pode ser realizado em qualquer situação para diferentes segmentos industriais que o forneçam. Alguns exemplos incluem:

- Empresas de Manutenção;
- Instituições Financeiras;
- Firms de Direito;
- Organizações que tratam com negócios de seguros e arriscados;
- Todas as Empresas de Engenharia;
- Indústria de Hospitalidade (hotéis, motéis, resorts e restaurantes);
- Instituições do Governo e Instituições Educacionais;
- Atendimento de saúde.

2.5. Princípio de Funcionamento

Para a aplicação da metodologia FMEA em um determinado serviço é necessário realizar uma análise dos fatos, formar um grupo pequeno (seis pessoas, por exemplo) e multidisciplinar de pessoas, ou seja, é necessária a participação de profissionais de diversas áreas como qualidade, desenvolvimento e operação. O objetivo é definir a função ou característica de um determinado serviço.

Na seqüência, todos os tipos de falhas potenciais devem ser relacionados. É descrito cada tipo de falha e também suas possíveis causas e efeitos, as quais são relacionadas às medidas de detecção e prevenção de falhas que estão sendo, ou já foram tomadas. Para cada causa de falha são atribuídos índices para avaliar os riscos e, por meio destes riscos, são discutidas medidas de melhoria (TOLEDO e AMARAL, 2007).

Para a avaliação do risco são levados em consideração quatro índices: Severidade (S), Ocorrência (O), Detecção (D) e Número de Prioridade de Risco (RPN), os quais estão descritos formalmente na Seção 2.6 desta dissertação. Esses índices são estabelecidos de acordo com critérios previamente definidos, para isso é necessário que a empresa tenha os seus próprios critérios adaptados a sua realidade. A avaliação de cada índice é independente entre si (TOLEDO e AMARAL, 2007).

2.5.1. Passos para Conduzir a FMEA

Para conduzir uma FMEA eficientemente, deve-se seguir um processo sistemático de doze passos a seguir (HELMAN e ANDERY, 1995):

1. Definir a equipe responsável pela execução;
2. Definir os itens do sistema que serão considerados;
3. Preparação prévia: coleta de dados;
4. Análise preliminar dos dados;
5. Identificação dos tipos de falhas e seus efeitos;
6. Identificação das causas das falhas;
7. Identificação dos controles atuais;

8. Análise das falhas para determinação de índices;
9. Análise das recomendações;
10. Revisão dos procedimentos;
11. Preenchimento do formulário FMEA;
12. Reflexão sobre o processo.

O formulário FMEA, citado no passo 11, é um documento no qual contém as informações dos resultados da aplicação da metodologia FMEA, que gera um histórico de falhas para análises futuras. Esse formulário é bastante flexível podendo ser adaptado aos diversos tipos de FMEA existentes de acordo com o problema a ser analisado. A Figura 2.1 mostra um exemplo de uma possível adaptação de formulário para uma FMEA de Sistema.

FMEA - Análise dos Modos e Efeitos de Falha																		
Sistema:							Data:				Responsável:							
Referência (Diagrama):							Aprovação:											
Item ou Função	Componente	Função	Modo de Falha	Causas de Falha		Efeitos de Falha		Índices				Ação Corretiva ou Preventiva	Índices Revistos					
				Imediata	Principal	Local	Próximo Nível	Final	S	O	D		RPN	S	O	D	RPN	

Figura 2.1 – Tabela do Formulário FMEA. Adaptação: STAMATIS, 1995.³

³ Nessa dissertação não se verificou os índices revistos, pois não era o objetivo da pesquisa. Porém após o resultado da FMEA o gestor deverá fazê-lo.

Assim, durante a execução da análise de uma FMEA deve-se responder às perguntas do diagrama ilustrado na Figura 2.2.

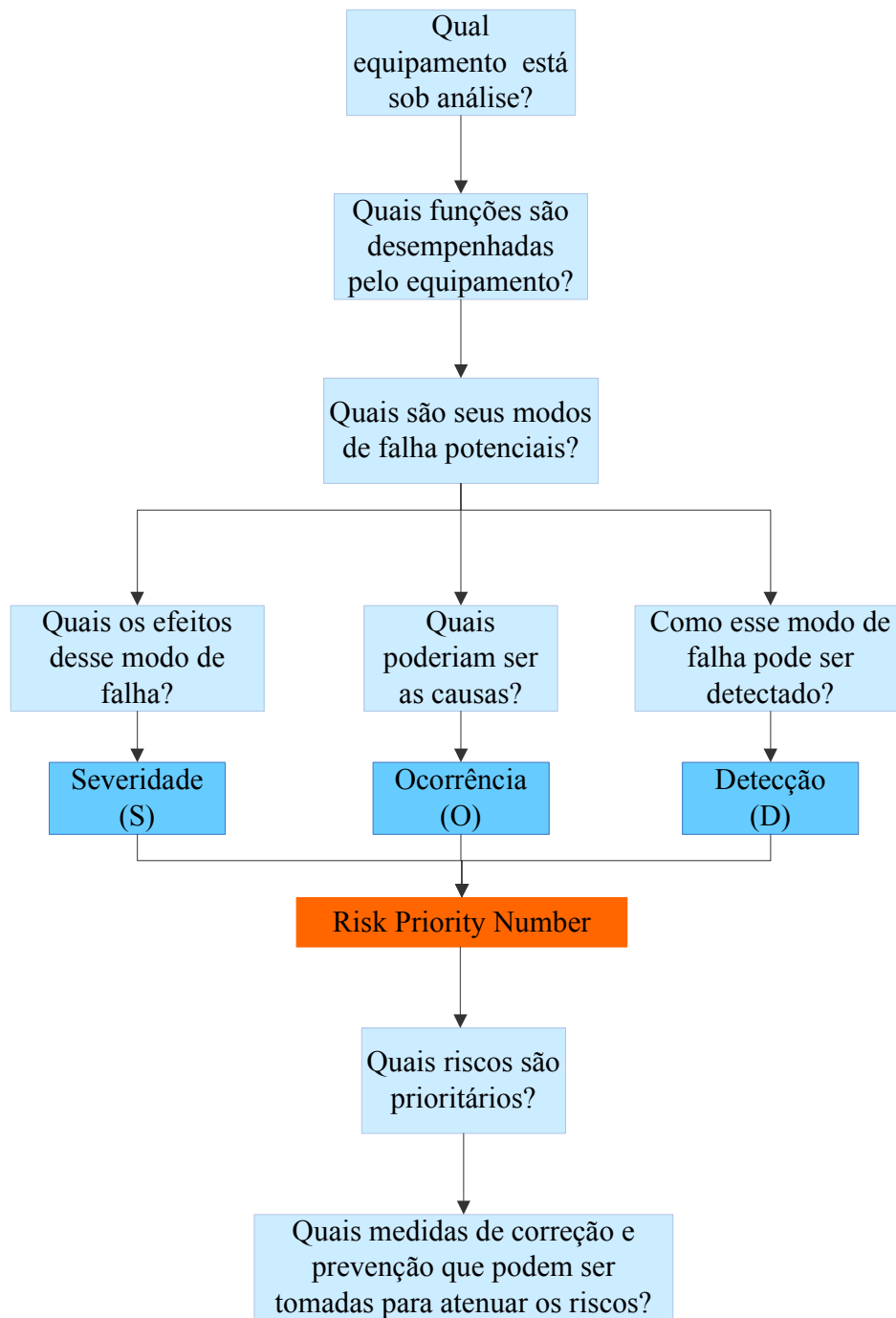


Figura 2.2 – Análise FMEA, com destaque para os índices S, O, D e RPN.

2.6. Número de Prioridade de Risco (RPN)

A FMEA tem como principal objetivo reduzir o risco associado às falhas potenciais e existentes e, com isso, reduzir a possibilidade de que estas possam vir a alcançar o cliente. Este risco é avaliado por meio do Número de Prioridade de Risco (RPN), conforme discutido a seguir.

O índice RPN tem como objetivo priorizar as ações corretivas, identificar as características críticas do sistema, avaliar a eficácia das ações tomadas para mitigar as causas, reduzir a severidade e melhorar a sua detecção. Após a obtenção do RPN, as causas são classificadas em ordem decrescente de acordo com o valor estimado para o risco e são direcionadas à atuação do gestor. Quanto menor o RPN, melhor para o sistema de distribuição e quanto maior, pior para o sistema. (VOLLERTT JUNIOR, 1996). Com isso, o índice RPN tem como finalidade:

- Eliminar o modo de falha (algumas falhas são mais evitáveis do que outras);
- Minimizar a severidade da falha;
- Reduzir a ocorrência do modo de falha;
- Melhorar a detecção;
- Priorizar os modos de falhas.

As falhas possuem diferentes prioridades, por isso é importante encontrá-las, uma vez que é a idéia fundamental da metodologia FMEA. Para isso, os índices auxiliares que ajudam a definir a prioridade das falhas são:

- Severidade (S): efeito ou impacto da falha no sistema/serviço;
- Ocorrência (O): frequência de ocorrência da falha;
- Detecção (D): habilidade de detectar a falha antes que ela atinja o cliente.
- Número de Prioridade de Riscos (RPN): define a prioridade da falha, e é composto pelo produto dos índices Severidade, Ocorrência e Detecção, conforme a Equação (2.1).

$$RPN_i = S_i \times O_i \times D_i \quad (2.1)$$

Há várias formas de definir os valores desses índices. A forma mais comum é usar escalas numéricas (chamadas de procedimento de critério de risco) que estão apresentadas nas Tabelas 2.1, 2.2 e 2.3. As escalas para cada índice dependem do tipo de aplicação e modelagem do problema. A análise realizada por esses procedimentos pode ser qualitativa ou quantitativa, como citado na Seção 2.2.

2.6.1. Severidade de Falha

O índice Severidade (S) é um indicador do impacto do efeito que um modo de falha potencial trará aos consumidores e à própria empresa, caso esta falha ocorra.

Para realizar a análise desse índice, utiliza-se uma tabela de procedimentos (Tabela 2.1) que reflete o resultado do sistema/serviço da empresa em relação ao consumidor e aos regulamentos governamentais. Na presente pesquisa foi utilizado como parâmetro para quantizar esse índice a Potência Não-Suprida (energia que deixou de ser entregue ao consumidor). No Capítulo 4 serão descritos formalmente os parâmetros atribuídos aos índices que compõe o RPN através de uma ordenação baseada em lógica *fuzzy*, a qual substitui a ordenação clássica (Tabelas 2.1, 2.2 e 2.3) por uma ordenação com um grau de pertinência associado.

O procedimento do SAE J1739⁴ recomenda que os efeitos da ocorrência do modo de falha sejam descritos como o efeito no consumidor, ou seja, como eles seriam observados ou experimentados pelo consumidor. Assim, o índice de Severidade é no máximo uma escala ordinal com a ordenação baseada em um julgamento subjetivo da severidade e designada pelas classificações das posições atribuídas (BOWLES, 2003).

⁴ SAE J1739 é uma norma internacional utilizada em aplicações automotivas, mais detalhes podem ser vistos em SAE Internacional (2002).

Tabela 2.1 – Procedimento de Critério de Severidade. Adaptação: STAMATIS, 1995.

Severidade	Critério	Ordenação
Nenhum	Nenhum efeito.	1
Muito Pequeno	Efeito muito pequeno no desempenho do sistema. A falha não foi percebida pelo consumidor.	2
Pequeno	Efeito leve podendo causar algumas desconformidades nos requisitos de desempenho do sistema e afetar a qualidade do serviço. A falha foi percebida rapidamente pelo consumidor.	3
Baixo	Efeito pequeno podendo causar algumas desconformidades nos requisitos de desempenho do sistema e afetar a qualidade do serviço. A falha causou uma pequena perturbação no consumidor.	4
Moderado	Efeito moderado podendo causar redução no desempenho do sistema. A falha causou alguma perturbação no consumidor.	5
Alto	O efeito causou falha parcial, o desempenho do sistema foi reduzido, gerando prejuízos para o sistema e afetando a qualidade do serviço. A falha causa perturbação no consumidor.	6
Muito Alto	Efeito severo afetando o desempenho do sistema e comprometendo a qualidade do serviço. O sistema foi danificado reduzindo a sua usabilidade. A falha deixa o consumidor insatisfeito com a qualidade do serviço e houve impacto na imagem da empresa.	7
Grave	Efeito no qual a causa torna o sistema inoperável, porém seguro. Resulta em prejuízo para o sistema, ambiente e qualidade do serviço. A falha deixou o consumidor muito insatisfeito e houve impacto na imagem da empresa.	8
Crítico	Efeito de risco potencial capaz de parar o sistema sem causar acidente – falha dependente do tempo. A conformidade com o regulamento governamental está em risco.	9
Perigoso	Efeito perigoso. Segurança relativa - falha repentina. Não está em conformidade com o regulamento governamental.	10

2.6.2. Ocorrência de Falha

O índice Ocorrência (O) é utilizado para identificar a frequência com que uma falha ocorre para cada uma das causas. Para esse índice, pode-se fazer uso de confiabilidade matemática, usar as frequências previstas, usar um número acumulativo de falhas de componentes por 100 ou 1000 componentes sobre a vida de projeto do componente em estudo. A Tabela 2.2 apresenta as caracterizações desse índice de acordo

com os graus definidos. Na presente pesquisa foi utilizado como parâmetro o FIC (%) para quantizar esse índice por meio do número de vezes que determinada falha ocorreu.

Esse índice fornece uma medida de intervalo para a classificação das posições mais baixas, no qual uma mudança na posição representa uma mudança proporcional na subjacente probabilidade de falha. Para a classificação de posições mais elevadas isto não é verdadeiro e a escala é uma escala ordinal em que elevados números de posição indicam uma elevada probabilidade de falha, mas o aumento relativo por mudança de uma unidade na posição varia (BOWLES, 2003). Devido às estas “imprecisões” aritméticas, aplicou-se nesta dissertação o conceito de funções de pertinência *fuzzy* às escalas do índice.

Tabela 2.2 – Procedimento de Critério de Ocorrência. Adaptação: STAMATIS, 1995.

Ocorrência	Critério	Nº de falhas/ 1000 Comp.	Ordenação
Quase Impossível	Falha improvável de ocorrer. Histórico não apresenta falhas.	< 0,00058	1
Remota	Número raro de falhas provavelmente.	0,0068	2
Muito Pequena	Muito poucas falhas provavelmente.	0,0063	3
Pequena	Poucas falhas provavelmente.	0,46	4
Baixa	Número ocasional de falhas provavelmente.	2,7	5
Média	Número médio de falhas provavelmente.	12,4	6
Moderadamente Alta	Número moderadamente alto de falhas é provável.	46	7
Alta	Número alto de falhas provavelmente.	134	8
Muito Alta	Número muito alto de falhas provavelmente.	316	9
Quase Certa	A falha é quase certa. Há histórico de falhas anteriores ou similares no sistema.	> 316	10

2.6.3. Detecção de Falha

O índice Detecção (D) de um modo de falha representa a habilidade de testes e de inspeções de planejamento em remover os defeitos ou em detectar tais modos de falha. Na presente pesquisa, esse índice foi modificado para melhor estimar a qualidade do

serviço de fornecimento de energia elétrica, para isso foi utilizado como parâmetro o indicador DIC (%) que mensura a duração da falha (em horas) que atingiu o consumidor, isto é, quanto menor a duração maior a facilidade de detecção. Para esse índice também foram utilizadas funções de pertinência *fuzzy* para modelar as escalas. A Tabela 2.3 apresenta as caracterizações desse índice.

O índice Detecção pode ser descrito ainda como uma escala ordinal, ordenada pela “probabilidade” do programa da verificação do serviço/sistema que detecta a falha (BOWLES, 2003).

Tabela 2.3 – Procedimento de Critério de Detecção. Adaptação: STAMATIS 1995.

Detecção	Critério	Ordenação
Quase Certa	Possui eficácia elevada para descobrir o modo de falha e a respectiva causa.	1
Muito Alta	Possui uma eficácia muito alta para descobrir o modo de falha e a respectiva causa.	2
Alta	Possui alta eficácia para descobrir o modo de falha e a respectiva causa.	3
Moderadamente Alta	Possui uma eficácia moderadamente alta para descobrir o modo de falha e a respectiva causa.	4
Média	Possui uma eficácia média para descobrir o modo de falha e a respectiva causa.	5
Baixa	Possui uma eficácia baixa para descobrir o modo de falha e a respectiva causa.	6
Pequena	Possui uma eficácia pequena para descobrir o modo de falha e a respectiva causa.	7
Muito Pequena	Possui uma eficácia muito pequena para descobrir o modo de falha e a respectiva causa.	8
Remota	A eficácia é desconhecida, ou não foi comprovada, ou não é confiável.	9
Quase Impossível	Nenhuma técnica de controle disponível ou conhecida para descobrir o modo de falha e a causa.	10

2.6.4. Ordenação dos Índices do RPN

A ordenação dos índices S, O e D para o critério de estimativa de risco pode ter qualquer valor, não havendo um padrão para cada valor. A metodologia FMEA clássica utiliza geralmente dois tipos de ordenação: a primeira se baseia numa escala de 1 a 5; e a segunda se baseia numa escala de 1 a 10 (STAMATIS, 1995), em que:

- Ordenação de 1 a 5: é limitado na natureza, mas oferece facilidade na interpretação. Porém, não fornece exatidão na quantificação da ordenação, pois reflete uma distribuição uniforme.
- Ordenação de 1 a 10: é muito usado e, de fato, é extremamente recomendado. Provê fácil interpretação, exatidão e precisão na quantificação da ordenação. Contudo um padrão de escalas (1 a 10) é difícil de ser definido (como é mostrado a seguir);
- Ordenação acima de 1 a 10: não é recomendado. Apesar de exato e preciso, é de difícil interpretação e com isso perde sua eficácia.

Para uma escala de critério de risco de 1 a 10 ($RPN_{\text{máximo}} = 10 (S) \times 10 (O) \times 10 (D) = 1000$) e uma confiança, por exemplo, de 95%, o valor inicial para analisar e ordenar as falhas seria um $RPN \geq 50$, ou seja, $1000 - 950 = 50$. Isto significa que esta falha não é perceptível pela detecção, é muito severa e a ocorrência é quase certa. Se a ocorrência é muito rara, esta seria 1 e o RPN diminuiria a 100. Assim, a análise de criticidade permite centrar-se sobre os riscos mais elevados. Esse número pode mudar de acordo com a escala escolhida e a confiança estatística que o engenheiro deseja, ou seja, não existe um padrão (STAMATIS, 1995). Deste modo, na presente pesquisa foi realizada uma adaptação dessas escalas de acordo com os parâmetros analisados no estudo em conformidade com uma concessionária brasileira. Assim, tem-se para Severidade uma escala de ordenação que varia de 1 a 3, para Ocorrência e Detecção uma escala de ordenação que varia de 1 a 8, nos quais quanto maior o índice, maior é o valor na escala de ordenação de risco, e pior é a qualidade da distribuição de energia. Para modelar essas escalas foram utilizadas funções de pertinência *fuzzy*.

Após a obtenção da estimativa de risco pelo índice RPN, as causas são ordenadas e direcionadas à atuação do gestor. Quanto menor o RPN, melhor para o sistema de distribuição e para a qualidade do serviço, e quanto maior o RPN, pior para o sistema de distribuição, qualidade do serviço e imagem da empresa. Com isso, é realizada a análise na Tabela 2.4 (VOLLERTT JUNIOR, 1996; STAMATIS, 1995).

Tabela 2.4 - Análise do índice RPN.

Valor do RPN	Ação
Pequeno	Nenhuma ação é tomada.
Moderado	Alguma ação pode ser tomada no local.
Elevado	Uma ação definida deverá ser tomada (validação seletiva e a avaliação podem ser requeridas).
Crítico	As ações definidas serão tomadas e as mudanças extensivas são requeridas no sistema/serviço.

A ordenação das falhas é realizada de forma decrescente, devido ser dada uma prioridade maior de ação corretiva aos modos de falha que possuem o RPN mais elevado. Isto significa que nem sempre os modos de falha com os números mais elevados de severidade devem ser tratados com maior prioridade, podendo haver falhas menos severas, mas que ocorrem com uma maior frequência e são menos detectáveis.

Uma vez que as ações foram efetuadas no sistema/serviço, um novo RPN deve ser verificado para confirmar as melhorias. Estes testes são frequentemente ilustrados sob forma de gráficos, para uma fácil visualização. Assim, sempre que um sistema ou serviço muda, uma classificação FMEA deve ser atualizada.

O RPN apresenta um problema relacionado com as considerações de variáveis lingüísticas, provindas de especialistas que devem compor a equipe para a execução da metodologia FMEA. Em virtude disso, pesquisadores de diferentes áreas vêm utilizando conceitos *fuzzy* para incorporar na análise as orientações de especialistas. A lógica *fuzzy* é utilizada para estabelecer as funções de pertinência associadas às opiniões dos especialistas, sendo essas opiniões mapeadas por meio de funções de pertinência. Por sua vez, essas funções de pertinência são associadas a cada um dos atributos a serem considerados na análise. No Capítulo 3 serão apresentadas as fundamentações teóricas referentes aos conceitos de lógica *fuzzy* (GARCIA, 2006).

2.6.5. Deficiências do Índice RPN

Segundo Bowles (2003), o RPN apresenta problemas em relação a sua análise. De uma perspectiva gerencial a metodologia é simples, fácil de compreender, direta na

utilização, bem documentada, e com treinamento apropriado, resultados consistentes podem ser obtidos. Infelizmente, de uma perspectiva técnica o método é seriamente defeituoso que torna a análise e a interpretação dos resultados problemáticos.

Os problemas com a metodologia incluem o uso de classificação ordinal dos números como quantidades numéricas, a presença de "lacunas" em uma grande parte da escala de medida de RPN, valores duplicados de RPN com características muito diferentes; e variação de sensibilidade para pequenas mudanças. A seguir são dados mais detalhes acerca desses problemas.

1) Lacunas na Escala

O RPN não é uma escala contínua, de fato ela possui muitas "lacunas", ou seja, muitos números na escala de 1 a 1000 não podem ser dados na forma do produto de S, O, e D. Este é, talvez, o mais sério dos problemas na interpretação do índice RPN. Quando é verdade que os números cobrem uma escala de 1 a 1000, 88% desse intervalo é vazio; somente 120 dos 1000 números gerados do produto de S, O e D são originais. Isto pode acontecer pelo fato dos números da escala ordinal serem números inteiros. Nenhum número que tem um fator principal maior de 10 pode ser dado na forma do produto de S, O, e D. Assim, os números 11, 22, 33,..., 990, todos múltiplos de 11, não podem ser formados e então são excluídos. Similarmente, todos os múltiplos de 13, 17, 19, etc., são excluídos. O número máximo gerado é 1000, o segundo maior é 900, seguidos por 810, 800, 729 e 720 (BOWLES, 2003).

Assim, na análise de RPN, os números elevados têm maior importância do que números baixos, mas a presença de lacunas torna difícil interpretar o que as diferenças entre os números significam.

2) Números de RPN Duplicados

Como dito anteriormente, para uma classificação com 10 graus de ordenação são formados 1000 números do produto gerados entre os índices S, O e D, mas que apenas 120 deles são únicos. Dentro desses 1000 números deve haver ainda, muitos números

duplicados. A ordenação do RPN pode ser feito de diversas maneiras, porém somente seis valores de RPN são formados por uma única combinação original de S, O e D. A título de ilustração é dado como exemplo o número 64. Esse número pode ser formado de 10 maneiras diferentes, como na Tabela 2.5. Os números RPN iguais a 60, 72 e 120, podem ser formados de 24 combinações diferentes de S, O e D. Similarmente os números RPN 24, 36, 40, 48, 80 e 180 podem ser formados de 21 combinações diferentes. A Figura 2.3 lustra o número de maneiras, com que cada número da escala do RPN pode ser formado (BOWLES 2003).

Tabela 2.5 – Combinações do RPN 64. Adaptação: BOWLES, 2003.

No. de Combinações	Severidade	Ocorrência	Detecção	RPN
1	1	8	8	64
2	2	4	8	
3	2	8	4	
4	4	2	8	
5	4	4	4	
6	4	8	2	
7	8	1	8	
8	8	2	4	
9	8	4	2	
10	8	8	1	

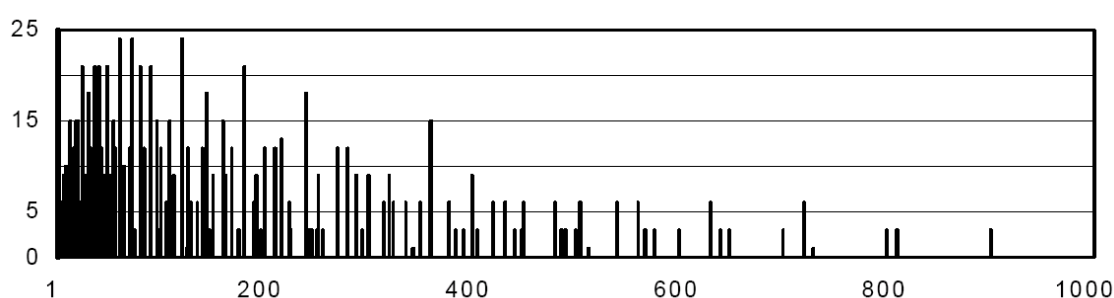


Figura 2.3 – Escala do RPN com o número de ocorrências de cada número. Fonte: Bowles, 2003.

3) Sensibilidade a Pequenas Mudanças

Pequenas variações em uma ordenação podem conduzir a efeitos muito diferentes no RPN, dependendo dos valores dos outros índices. Assim, uma mínima alteração em um dos três índices que compõem o RPN, causa um efeito muito maior quando os outros

dois fatores forem maiores do que quando estes forem pequenos. Por exemplo, sejam S, D e O igual a 10, para esses valores tem-se o RPN 1000. Então, se diminuir em 1 ponto do valor de um deles o RPN será 900. Nota-se que a diferença a essa pequena variação de 1 ponto, em um índice, gerou uma diferença de 100 pontos entre os dois valores de RPN encontrados. Similarmente, para S, O e D iguais a 4, tem-se o RPN 64. Se diminuir um dos três fatores de 1 ponto no valor, tem-se um RPN 48. A diferença entre os RPNs encontrados foi 16 pontos (BOWLES 2003).

Observa-se na afirmação dos dois exemplos que para valores altos de S, O e D a diferença no valor de RPN sofrida por uma pequena variação é maior do que para valores mais baixos. Com isso, julgamentos individuais podem gerar diferenças pequenas na ordenação da severidade e podem conduzir às diferenças maiores na ordenação mais subjetiva da detecção. Estas pequenas diferenças podem conduzir a grandes diferenças na ordenação do índice RPN para modos de falha muito similares.

Assim, o número gerado pelo índice RPN não está em uma escala contínua como pode ser observado na Figura 2.3, pois possui muitas “lacunas”. Um número pode ser construído de muitas combinações diferentes de ordenações de Severidade, Ocorrência e Detecção. Finalmente, pequenas alterações em um desses índices podem ter efeitos diferentes na análise de RPN dependendo dos valores dos outros números.

Estas limitações do índice de risco (RPN) foram atenuadas através da metodologia aplicada nesta dissertação.

2.7. Principais Aplicações

A metodologia FMEA/FMECA possui aplicações nos mais diversos segmentos de indústrias e empresas. Ela é utilizada no planejamento das atividades de manutenção do sistema, projeto de subsistema, e como uma estrutura para detecção e isolamento da falha no sistema. Nas indústrias militar, aeroespacial e nuclear, onde a questão da segurança está em primeiro lugar, a FMEA/FMECA começa um processo essencial no projeto de sistemas no início do estágio de desenvolvimento conceitual para projetos e teste. Essa

metodologia pode ser aplicada ainda em vários níveis, como por exemplo, componentes, equipamentos ou sistemas, dependendo do grau de detalhamento desejado (MACESKER *et al.*, 2001). Assim, ela pode ser utilizada:

- Na fase de projeto de sistemas, visando detectar possíveis falhas e melhorar a confiabilidade do sistema;
- Na revisão de segurança de sistemas/unidades em operação, procurando verificar a propagação das falhas sobre os outros componentes do sistema e as implicações para a segurança das instalações;
- No contexto de uma análise global de riscos, tanto de sistemas na fase de projeto, como de sistemas em operação ou em fase de ampliação.
- Em revisões de sistemas mecânicos e elétricos;
- Como base para otimização de planejamento da manutenção a equipamentos, por focar sistematicamente nos modos de falha (Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM));
- Na coleta de informações necessárias para diagnósticos de problemas no sistema.

2.8. Benefícios da FMEA para as Empresas

Segundo TOLEDO e AMARAL (2007), a metodologia FMEA pode proporcionar como benefícios para a empresa:

- Possibilidade de obter um catálogo de informações sobre as falhas dos produtos/processos;
- Melhor conhecimento dos problemas nos produtos/processos;
- Ações de melhoria no projeto do produto/processo, baseado em dados e devidamente monitoradas (melhoria contínua);
- Diminuição de custos por meio da prevenção de ocorrência de falhas;
- Desenvolve uma lista classificatória de modos de falhas potenciais, estabelecendo um sistema de priorização para considerações de ações corretivas;

- Benefício de incorporar dentro da organização a atitude de prevenção de falhas, a atitude de cooperação e trabalho em equipe e a preocupação com a satisfação dos clientes.

2.9. Limitações da FMEA

Apesar da metodologia FMEA ser altamente eficaz em várias análises dos modos de falha do sistema, ela possui algumas limitações. Quatro dessas limitações estão listadas a seguir (MACESKER *et al.*, 2001):

1. **A investigação do erro humano é limitada.** Uma FMEA clássica leva em consideração somente os erros humanos potenciais, assim caso ocorram, erros humanos que não causem falhas nos equipamentos, elas são omitidas. Na presente pesquisa os erros humanos são refletidos nos índices Ocorrência e Detecção de acordo com a causa de falha.
2. **O foco é direcionado a um único evento do problema.** As falhas ocorridas nos equipamentos são analisadas individualmente uma a uma, de forma que combinações importantes de falhas nos equipamentos são omitidas.
3. **A investigação de influências externas é limitada.** Uma FMEA típica trata de influências externas potenciais, no entanto influências externas que afetam no desempenho e segurança do trabalhador são omitidas caso elas não causem falhas nos equipamentos. Contudo, na aplicação em qualidade de serviço, causas externas podem ser incluídas nos modos de falha, como por exemplo, descargas atmosféricas e abalroamento⁵ em poste.
4. **Os resultados são dependentes do modo de operação.** Os efeitos dos modos de falha dos equipamentos variam com frequência, dependendo do modo de operação do sistema. Com isso, mais de uma FMEA pode ser necessária para um sistema que tem múltiplos modos de operação.

⁵ Abalroamento corresponde a acidentes de colisão nos quais os veículos colidem lateral ou transversalmente, estando os mesmos trafegando pela mesma via, podendo ser no mesmo sentido ou em sentidos contrários.

Note que a falha humana e os efeitos ambientais constituem uma fonte de principais modos e causas comuns de falha, especialmente na FMEA de processo e serviço, conforme realçados acima.

2.10. Considerações Finais

De acordo com o que foi apresentado nesse capítulo, a metodologia FMEA realiza o diagnóstico de falhas em um sistema/serviço e identifica as ações corretivas requeridas para preveni-las de forma que as mesmas não atinjam o cliente. Assim, é possível garantir maior qualidade e confiabilidade no produto ou serviço.

Observou-se que a metodologia do RPN é limitada em alguns aspectos que dizem respeito à ordenação. O problema principal reside no fato das escalas usadas para ordenar os modos de falha, em termos de Severidade, Ocorrência e Detecção, serem escalas ordinais. As operações matemáticas (numéricas) feitas através desses três índices, e em especial a multiplicação, geram resultados com significado útil, que algumas vezes, podem levar à uma interpretação equivocada da escala de valores.

Do exposto acima, esta dissertação propõe modificar a FMEA clássica reavaliando e redefinindo a escala dos índices S, O e D e utilizando a lógica *fuzzy* para resolver os problemas relacionados a interpretação do RPN clássico, quando aplicados na avaliação do desempenho de uma rede elétrica.

Os dados levantados para realização da FMEA proposta são considerados para uma tomada de decisão envolvendo risco de ultrapassagem da meta de indicadores de continuidade individuais DIC e FIC por uma concessionária brasileira.

Com isso, será aplicado nesta pesquisa os principais conceitos da metodologia FMEA, reformulando suas escalas, utilizando apenas o conceito de índice de risco (RPN) assim como os índices (Severidade, Ocorrência e Detecção) que o compõem, conforme apresentados no Capítulo 4.

3. LÓGICA *FUZZY*

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos básicos acerca da lógica, teoria dos conjuntos e números *fuzzy* que são necessários para o entendimento e desenvolvimento da metodologia proposta. Nesse intuito, foi realizada uma abordagem geral dos conceitos utilizados no processo de desenvolvimento.

3.1. Visão Geral

A humanidade tem se esforçado em entender as leis que governam o mundo por meio de tentativas contínuas em descrever os fenômenos ocorridos e observados. O objetivo é conseguir descrições adequadas por meio de termos exatos e precisos desses fenômenos. Pode-se dizer que a linguagem matemática é a melhor ferramenta para expressar tais descrições, entretanto a teoria de conjuntos clássicos é insuficiente para alguns casos que estão relacionados à incerteza (WOLFRAM, 2008).

Assim em 1965, o professor L. A. Zadeh da Universidade da Califórnia publicou um artigo que veio a definir uma metodologia conhecida atualmente como lógica *fuzzy* ou lógica difusa. Zadeh (1980) desenvolveu esta metodologia após perceber que sistemas complexos não poderiam ser tratados de forma eficiente pelo uso de aproximações convencionais, pois a descrição das linguagens matemáticas não era expressiva o suficiente para caracterizar as relações de entrada/saída em um ambiente de informação imprecisa. Desta forma, percebeu que era necessário utilizar um conceito de **grau de pertinência** a um conjunto, atribuindo valores em um intervalo unitário. Assim, a teoria dos conjuntos *fuzzy* oferece uma linguagem matemática mais expressiva e uma lógica mais flexível para caracterizar e inferir relações que contenham alguma imprecisão, as

quais incluem o julgamento humano. Essa teoria pode ser empregada nas mais diversas aplicações como, por exemplo, sistemas elétricos, controles de processo industrial, diagnósticos médicos e análise de informações.

Essa teoria é um campo ativo de pesquisa na matemática e se tornou uma ferramenta padrão para tratar os sistemas que são considerados muito complexos ou mal definidos para serem analisados por meio de técnicas convencionais. Assim, os conceitos de lógica *fuzzy* vêm sendo aplicados com sucesso em sistemas de energia elétrica (BASTANI *et al.*, 1994; BOWLES e PELÁEZ, 1995; CHOI *et al.*, 2005).

Na lógica *fuzzy* é utilizado um conceito dado pela expressão de uma visão ou de um julgamento de um especialista para a definição dos seus conjuntos, sendo uma parte importante no sucesso da utilização da metodologia. Expressar a opinião de uma forma significativa e eloqüente é uma característica importante. A expressão pode ser sensível à escolha de uma palavra, de uma frase, de uma sentença, de um símbolo, ou de uma figura particular. Pode igualmente incluir uma mostra do sentimento ou da personalidade. Pode ser sob a forma de um símbolo ou conjunto de símbolos que expressam algumas relações matemáticas ou analíticas, como uma quantidade ou uma operação (AYYUB, 2001).

A lógica aplicada aos conjuntos clássicos é baseada na lógica de Aristóteles, fazendo uso da álgebra booleana que só admite valores de verdadeiro ou falso para as proposições. Na lógica *fuzzy* um elemento pode pertencer a um dado conjunto *fuzzy* com um determinado grau, e assim se tem a função de pertinência, que é a função que define o grau de pertinência de um elemento num conjunto *fuzzy* (AYYUB, 2001).

O grau de pertinência desenvolvido por Zadeh, ou comumente chamado de **medida de nebulosidade**, é definido, pela teoria de conjunto *fuzzy*, como a incerteza em relação à pertinência a um (ou mais) conjunto (s) ou conceito de um determinado valor (AYYUB, 2001).

A seguir são apresentados alguns conceitos da teoria de conjuntos *fuzzy* e números *fuzzy* necessários ao desenvolvimento e compreensão da metodologia proposta, apresentado no Capítulo 4.

3.2. Princípio da Extensão de Zadeh

Zadeh estendeu a idéia de pertinência binária à pertinência *fuzzy* na sua formulação com o objetivo de acomodar vários valores de graus de pertinência no intervalo real contínuo $[0, 1]$. Assim, um número infinito de valores entre os limites do intervalo pode representar vários graus de pertinência para um elemento x em algum conjunto do universo. Dessa forma, o Princípio da Extensão de Zadeh representa a extensão do mapeamento de um conjunto *fuzzy* ou função *fuzzy* de um universo a outro universo. Ele estendeu os conceitos de conjuntos: domínio, contradomínio e imagem dos conjuntos clássicos aos chamados “conjuntos *fuzzy*” (ZADEH, 1965; ROSS, 2004). Estes são os conjuntos do universo X que podem ser acomodados a graus de pertinência. A Equação (3.1) descreve o Princípio de Extensão de Zadeh.

$$\mu_B(y) = \max_{y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)} \left[\min \left[\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n) \right] \right] \quad (3.1)$$

A Equação (3.1) é expressa para função (f) de valores discretos. Para valores contínuos a função (f) é expressa de forma semelhante substituindo-se o operador \max pelo operador \sup (*supremum*) (ROSS, 2004).

O Princípio de Extensão é considerado um teorema importante da teoria dos conjuntos *fuzzy*. Fornece um método geral para estender conceitos matemáticos clássicos para teoria *fuzzy*, tal como operações algébricas aplicadas a números *fuzzy*. Assim, as operações aritméticas (adição, subtração, multiplicação e divisão) dos conjuntos clássicos também podem ser aplicadas aos números *fuzzy*, sendo essas operações generalizações computacionalmente efetivas de análise de intervalo (LIMA, 2003). As Figuras 3.1 e 3.2 ilustram exemplos de número clássico e número *fuzzy*, respectivamente, nas quais pode ser observada a questão da pertinência discutida para os dois tipos de conjuntos.

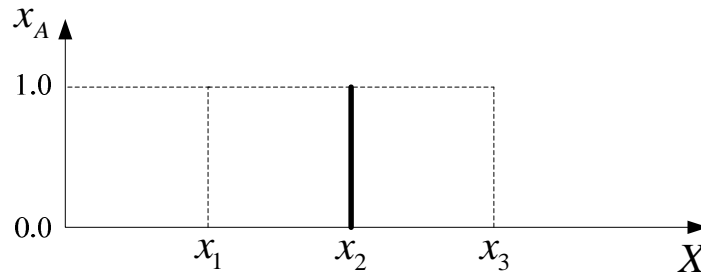


Figura 3.1 – Função de pertinência de um número clássico com valor exatamente 2.

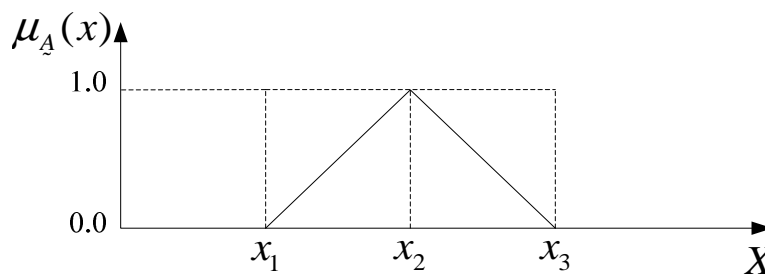


Figura 3.2 – Função de pertinência de um número *fuzzy* com valor aproximadamente 2.

3.3. Conjuntos Fuzzy

Um conjunto clássico pode ser definido como uma coleção de elementos ou componentes em que todos possuem as mesmas características. O conjunto que contém todos os possíveis elementos é chamado de universo de discurso X . Esses elementos individuais são denotados por x e podem ser classificados como números discretos, números inteiros contáveis ou quantidades de valores contínuos em um limite real. (AYYUB, 2001; ROSS, 2004).

Os conjuntos clássicos possuem limites bem definidos, enquanto que os conjuntos *fuzzy* possuem limites imprecisos, ou seja, que precisam ter um grau de pertinência associado. A diferença fundamental entre os conjuntos clássicos e os conjuntos *fuzzy* está relacionada à transição de um elemento em um universo de discurso entre a pertinência e a não-pertinência a um determinado conjunto. No caso dos conjuntos clássicos essa transição é realizada de forma abrupta, ou seja, um elemento totalmente pertencente ou totalmente não pertencente a um conjunto, não há incerteza com relação à pertinência ou não do elemento a um determinado conjunto. Assim, para um elemento pertencer a um

conjunto o seu grau de pertinência tem que ser completo, ou seja, igual a 1. No caso dos conjuntos *fuzzy* a transição da pertinência ou não-pertinência de um elemento a um determinado conjunto é gradual e envolve variáveis com nível de incerteza, como por exemplo, o ‘talvez’. Os elementos podem pertencer a um conjunto com diferentes graus de pertinência dentro do intervalo $[0,1]$ (AYYUB, 2001; ROSS, 2004).

Zadeh (1965) define conjunto *fuzzy* como uma classe de objetos com graus de pertinência em um intervalo real e contínuo $[0,1]$, ou seja, $\mu_A(x) \in [0,1]$. Deste modo, um conjunto é caracterizado por uma função de pertinência, o que atribui para cada objeto um grau de pertinência em uma faixa entre 0 e 1. Há um número infinito de valores dentro dessa faixa que podem representar esses graus de pertinência.

Segundo Rentería (2006), um conjunto *fuzzy* pode ser interpretado como uma ponte que liga o conceito impreciso à sua modelagem numérica, atribuindo-se a cada indivíduo no universo um valor entre 0 e 1, que representa o grau de pertinência deste indivíduo ao conjunto *fuzzy*.

Os conjuntos *fuzzy* podem expressar mais realisticamente transições graduais de pertinência à não-pertinência de um determinado conjunto. Em virtude disso, os especialistas podem encontrar expressões mais significativas que provém de opiniões advindas desses especialistas, mesmo usando termos vagos e palavras em linguagens naturais (por exemplo: talvez, morno, grande e pobre). Observa-se que, nos conjuntos clássicos estas expressões não podem ser modeladas utilizando esses termos vagos. Assim, as funções de pertinência podem ser desenvolvidas baseadas, de forma subjetiva, na experiência e interpretação dos especialistas de forma a dar significado dentro de expressões numéricas a essa vagueza (AYYUB, 2001).

A função de pertinência incorpora a representação matemática de pertinência em um conjunto clássico A , e a notação utilizada ao longo desse texto para conjunto *fuzzy* é representada \tilde{A} , no qual o mapeamento funcional é dado por:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) : X \rightarrow [0,1], \text{ em que } x \in X \quad (3.2)$$

O símbolo $\mu_A(x)$ é o grau de pertinência do elemento x a um conjunto *fuzzy*. Então $\mu_A(x)$ é um valor no intervalo unitário que mede o grau com que cada elemento x pertence ao conjunto *fuzzy* A , ou seja, $\mu_A(x)$ representa o grau com que $x \in A$.

Um conjunto *fuzzy* A pode ser representado quanto ao universo de discurso X por meio de duas formas: discreto (o universo de valores é finito) ou contínuo (o universo de valores é infinito). As Equações (3.3) e (3.4), respectivamente, denotam isso (ROSS, 2004).

$$A = \left\{ \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots \right\} = \left\{ \sum_i \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \right\} \quad (3.3)$$

$$A = \left\{ \int \frac{\mu_A(x)}{x} \right\} \quad (3.4)$$

Os símbolos $(/, +, \Sigma, \int)$ nas Equações (3.3) e (3.4) não expressam o mesmo significado das operações matemáticas algébricas. O primeiro símbolo representa um delimitador entre o valor de pertinência no conjunto A (numerador) e o elemento x de discurso (denominador). Os demais sinais representam agregação para as variáveis. As duas notações foram desenvolvidas por Zadeh (1965).

3.3.1. Funções de Pertinência

As funções de pertinência podem ter diferentes formas, dependendo do conceito que se deseja representar e do contexto que serão utilizadas. Elas podem ser definidas a partir da experiência do especialista, mas é comum fazer uso das formas padrão: triangular, trapezoidal e gaussiana. (AGUIAR *et al.*, 2007). Também podem ser simétricas ou assimétricas. São tipicamente definidas em universos unidimensionais, mas certamente também podem ser definidas em universos n -dimensionais. As formas mais comuns de funções de pertinência são as normais e convexas (Seção 3.3.2), entretanto muitas operações com funções de pertinência podem resultar em conjuntos *fuzzy* que são

subnormais e não-convexos. Como por exemplo, o Princípio da Extensão de Zadeh e operador de união (ROSS, 2004).

A Figura 3.3 ilustra as características de uma função de pertinência, na sequência é descrito cada uma dessas características.

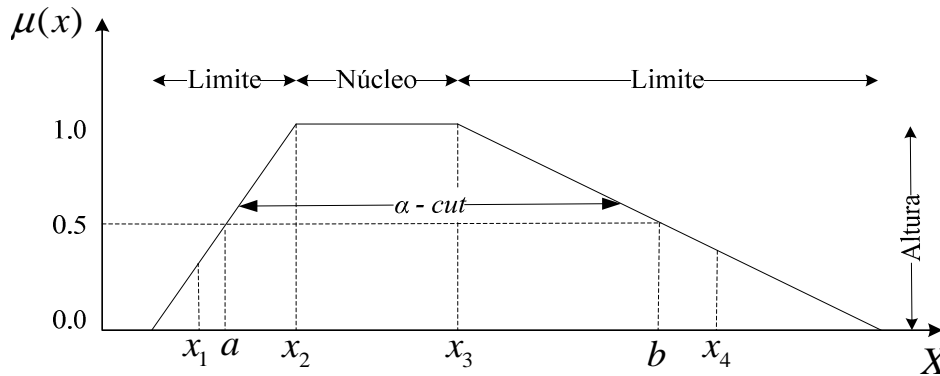


Figura 3.3 – Características de um conjunto *fuzzy*. Adaptação: KISHK e AL-HAJJ, 2000.

O **núcleo** de uma função de pertinência para um dado conjunto *fuzzy* \tilde{A} representa a região do universo X que é caracterizado pela pertinência total em um conjunto \tilde{A} , ou seja, que grau de pertinência igual a 1 (ROSS, 2004; RENTERÍA 2006).

$$nuc(\tilde{A}) = \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) = 1\} \quad (3.5)$$

Os **limites** de uma função de pertinência para um dado conjunto *fuzzy* \tilde{A} são definidos como a região do universo X que contém os elementos com pertinência entre 0 e 1. Assim, os limites compreendem os elementos x do universo com algum grau de nebulosidade, ou somente pertinência parcial a um conjunto \tilde{A} (ROSS, 2004; RENTERÍA, 2006).

O **α -cut** (corte de nível α) de um conjunto *fuzzy*, $[a,b]$ é definido pela Equação 3.6 (KISHK e AL-HAJJ, 2000).

$$A^\alpha = \{x \in X \mid \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (3.6)$$

O **suporte** de uma função de pertinência para um dado conjunto *fuzzy* \tilde{A} representa a região do universo X sobre a qual a função de pertinência não é nula (ROSS, 2004; KISHK E HAJJ, 2000). A sua notação é $\text{supp}(\tilde{A})$ e dada pela Equação (3.7).

$$\text{supp}(\tilde{A}) = \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \neq 0\} \quad (3.7)$$

Se o suporte em um conjunto *fuzzy* \tilde{A} corresponde a um único ponto em X e com grau de pertinência igual a 1, esse conjunto é chamado *singleton* (Figura 3.1).

A **altura** de um conjunto *fuzzy* \tilde{A} corresponde ao maior grau de pertinência obtido por qualquer elemento do conjunto, e é definida pela Equação (3.8).

$$h(\tilde{A}) = \sup_{x \in X} [\mu_{\tilde{A}}(x)] \quad (3.8)$$

A altura de um conjunto *fuzzy* \tilde{A} pode ser interpretada como o grau de validação ou credibilidade da informação expressa por \tilde{A} (KLIR e YUAN, 1995).

Os **pontos de cruzamento** de uma função de pertinência são definidos como os elementos no universo para os quais um determinado conjunto *fuzzy* \tilde{A} tem valores iguais a 0,5, ou seja, para que $\mu_{\tilde{A}}(x) = 0,5$ (ROSS, 2004).

3.3.2. Classificação de Conjuntos

Os conjuntos *fuzzy* podem ser classificados como: **normal**, **subnormal**, **convexo** e **não-convexo**. Na sequência é dada uma abordagem sobre o tema.

Um conjunto *fuzzy* \tilde{A} é dito **normal** se ele possuir pelo menos um elemento x no universo com o grau de pertinência igual a 1, ou seja, $h(\tilde{A}) = 1$ (KLIR e YUAN, 1995). No qual:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = 1 \quad (3.9)$$

Caso a altura da função de pertinência de \tilde{A} seja menor que 1, isto é, $h(\tilde{A}) < 1$, o conjunto é dito **subnormal**. No qual:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) < 1 \quad (3.10)$$

Um conjunto *fuzzy* \tilde{A} é dito **convexo** quando os graus de pertinência desse conjunto aumentam monotonicamente ou decrescem monotonicamente com o aumento dos valores dos elementos no universo, isto é, quando satisfaz a relação da Equação (3.11) de acordo com a Figura 3.4. Caso contrário, o conjunto é dito **não-convexo** como ilustra a Figura 3.5 (ROSS, 2004).

$$\mu_{\tilde{A}}(x_2) \geq \min[\mu_{\tilde{A}}(x_1), \mu_{\tilde{A}}(x_3)] \quad (3.11)$$

Essa equação sumariza a definição de convexidade em conjuntos *fuzzy* que é diferente do conceito de convexidade utilizado em algumas áreas da matemática.

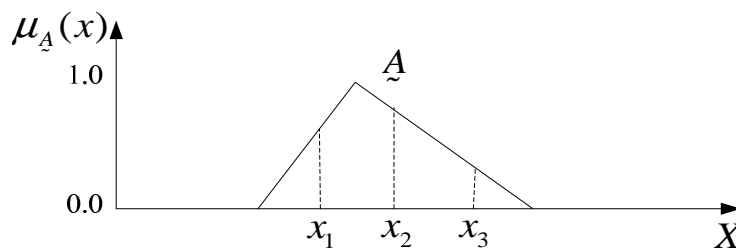


Figura 3.4 – Conjunto *fuzzy* normal e convexo. Fonte: ROSS, 2004.

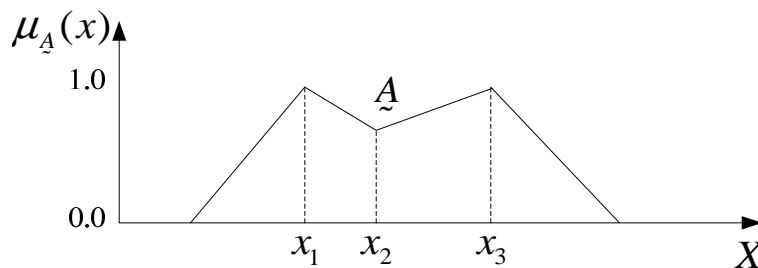


Figura 3.5 – Conjunto *fuzzy* normal e não-convexo. Fonte: ROSS, 2004.

Uma propriedade especial de conjuntos *fuzzy* convexas é que a interseção entre dois conjuntos *fuzzy* convexas \tilde{A} e \tilde{B} , também resulta em um conjunto convexo $\tilde{A} \cap \tilde{B}$ (ROSS, 2004).

3.3.3. Conjuntos α -cut

Os conjuntos *fuzzy* podem ser descritos efetivamente de uma maneira que facilite a execução de suas operações, para isso, utiliza-se o conceito de conjunto α -cut. Este conjunto é um conjunto clássico e pode ser descrito como um conjunto *fuzzy* \tilde{A} definido em um universo X , no qual representa um limite ao domínio do conjunto considerando um valor ' α '. Como resultado, tem-se um conjunto A^α com todos os elementos que possuem um grau de pertinência em \tilde{A} maior ou igual a α . O valor α pode variar em um intervalo fechado $[0, 1]$ (Ayyub, 2001; RENTERÍA, 2006). O conjunto α -cut de \tilde{A} é definido pela Equação (3.12).

$$A^\alpha = \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\} \quad (3.12)$$

Então esta Equação representa um conjunto clássico de x valores tal que $\mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha$. Para conjuntos *fuzzy* de valores reais contínuos e funções de pertinência unimodais, o resultado α -cut de \tilde{A} é um intervalo de valores reais. Um α -cut **forte** é definido pela Equação (3.13).

$$A^{\alpha+} = \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) > \alpha\} \quad (3.13)$$

Desta forma, a função de pertinência de um conjunto *fuzzy* \tilde{A} pode ser expressa em termos da função característica de seus α -cuts de acordo com a Equação (3.14) (DUBOIS e PRADE, 1980).

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \sup_{\alpha \in [0,1]} \min(\alpha, \mu_{A^\alpha}(x)) \quad (3.14)$$

Na qual,

$$\mu_{A^\alpha}(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in A^\alpha \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Qualquer conjunto *fuzzy* pode ser transformado em um número infinito de conjuntos α -cut, pois há um número infinito de valores α no intervalo $[0,1]$. Qualquer

elemento $x \in A^\alpha$ pertence a A com um grau de pertinência que é maior ou igual ao valor de α (ROSS, 2004). A Figura 3.6 ilustra um exemplo de intervalo do conjunto A^α para um determinado valor de α .

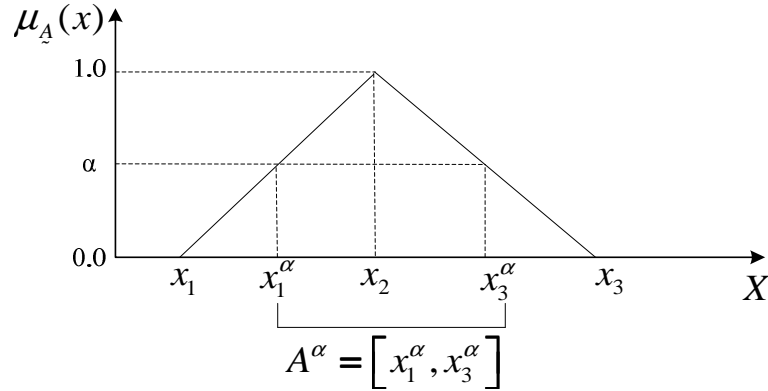


Figura 3.6 – Função pertinência do conjunto A^α . Adaptação: RENTERÍA, 2006.

Os conjuntos α -cut, obedecem a quatro propriedades especiais (SIVANANDAM *et al.*, 2006):

1. $(A \cup B)^\lambda = A^\lambda \cup B^\lambda$
2. $(A \cap B)^\lambda = A^\lambda \cap B^\lambda$
3. $(\bar{A})^\lambda \neq \bar{A}^\lambda$, exceto para o valor de $\lambda = 0,5$
4. Para qualquer $\lambda \leq \alpha$, onde $0 \leq \alpha \leq 1$, é verdade que $A^\alpha \subseteq A^\lambda$, onde $A^0 = X$.

Como foi citado anteriormente, as operações aritméticas entre conjuntos *fuzzy* podem ser realizadas por meio dos conjuntos α -cut. Para realizar essas operações o conjunto A^α utiliza somente o limite inferior e o limite superior dos parâmetros do intervalo dos conjuntos *fuzzy* (Figura 3.6) (RENTERÍA, 2006). Nesta pesquisa, utilizou-se o conceito de conjunto *fuzzy* aplicado à números *fuzzy*, cujo conceito está descrito na Seção 3.4. Então para realizar a conversão de um número *fuzzy* $A = [x_1, x_2, x_3]$ em um conjunto A^α utiliza-se a Equação (3.15).

$$A^\alpha = [(x_2 - x_1)\alpha + x_1, -(x_3 - x_2)\alpha + x_3] \quad (3.15)$$

Assim, na conversão é gerado um conjunto α -cut com dois elementos que representam o limite superior e o limite inferior do intervalo do conjunto, Equação (3.16). Esses valores são encontrados pela substituição do α no intervalo $[0, 1]$.

$$A^\alpha = [x_1^\alpha, x_3^\alpha]. \quad (3.16)$$

3.4. Número Fuzzy

Os conjuntos *fuzzy* são definidos no conjunto de números reais (\mathfrak{R}) (KLIR e YUAN, 1995). A Equação (3.17) expressa a função de pertinência do conjunto *fuzzy* \underline{A} .

$$\underline{A} : \mathfrak{R} \rightarrow [0, 1] \quad (3.17)$$

Os conjuntos *fuzzy*, sob certas propriedades, podem ser vistos como números *fuzzy* (números que são aproximadamente um dado número real) ou intervalos *fuzzy* (números que estão em volta de um dado intervalo de números reais) de acordo com a Figura 3.2. Um conjunto *fuzzy* \underline{A} nos reais (\mathfrak{R}) para caracterizar um número *fuzzy* deve atender pelo menos as três propriedades a seguir:

- \underline{A} deve ser um conjunto normal e convexo;
- A^α deve ser um intervalo fechado para todo $\alpha \in (0, 1]$;
- O suporte de \underline{A} , \underline{A}^{0+} , deve ser limitado.

Um número *fuzzy* é expresso pela Equação (3.18).

$$\underline{A} = (x, \mu_{\underline{A}} \mid x \in \mathfrak{R}) \quad (3.18)$$

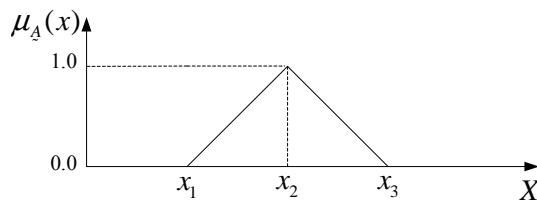
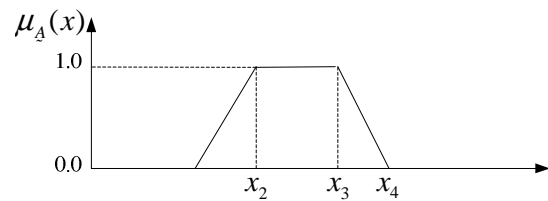
Os números *fuzzy* podem ser representados por diversas formas de função pertinência: triangular, gaussiana, trapezoidal, *sigmoidal*, etc. Os números mais comumente utilizados em aplicações são: triangular e trapezoidal. Esses últimos foram aplicados no escopo da metodologia proposta, a ser apresentada no Capítulo 4. As

funções de pertinência que atribuem o grau de pertinência (μ_A) para esses números estão descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Número *fuzzy* triangular e trapezoidal

Número <i>Fuzzy</i> Triangular	Número <i>Fuzzy</i> Trapezoidal
$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, & \text{se } x \in [x_1, x_2] \\ \frac{x_3 - x}{x_3 - x_2}, & \text{se } x \in [x_2, x_3] \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$	$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < x_1; \\ \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, & \text{se } x \in [x_1, x_2]; \\ 1, & \text{se } x \in [x_2, x_3] \\ \frac{x_4 - x}{x_4 - x_3}, & \text{se } x \in [x_3, x_4] \\ 0, & \text{se } x > x_4 \end{cases}$

Se a forma da função de pertinência é triangular, o conjunto *fuzzy* é chamado de número *fuzzy* triangular. O número *fuzzy* triangular é geralmente utilizado quando o parâmetro em análise possui uma faixa de variação e um número dentro desta faixa possui uma possibilidade de ocorrência num único pico maior do que os outros. Assim, um número *fuzzy* triangular pode ser usado para representar uma aproximação numérica. Desta forma, a potência nominal de um determinado transformador é 1 kVA, porém sabe-se que este valor nominal é apenas uma aproximação do valor real. Da mesma forma, um número *fuzzy* trapezoidal é uma aproximação de um intervalo, por exemplo, um determinado transformador com potência nominal de 1 kVA pode trabalhar com uma sobrecarga até 50%, ou seja, uma faixa de 1 a 1,5 kVA. (AYYUB, 2001; RENTERÍA, 2006). As Figuras 3.7 e 3.8 ilustram números *fuzzy* triangular e trapezoidal, respectivamente.

Figura 3.7 – Número *fuzzy* triangularFigura 3.8 – Número *fuzzy* trapezoidal

Para um número real cujo valor preciso não é conhecido com exatidão, este número é definido por meio de um intervalo *fuzzy*. Segundo Rentería (2006) um intervalo *fuzzy* é geralmente representado por dois pontos extremos x_1 e x_3 (um limite inferior e

um limite superior) e, também um ponto médio x_2 (o valor mais provável, ou seja, o que possui o maior grau de pertinência) como (x_1, x_2, x_3) para um número *fuzzy* triangular.

As operações aritméticas de α -cut também podem ser aplicadas a números *fuzzy* conforme a Seção 3.5.

3.5. Operações Aritméticas

O Princípio da Extensão de Zadeh (Seção 3.2) é um importante conceito da teoria dos conjuntos *fuzzy* que define as operações aritméticas. Assim como para os números reais (*crisp*), as operações de adição, subtração, multiplicação e divisão também são aplicadas aos números *fuzzy* (ROSS, 2004).

Dessa forma, sejam \underline{M} e \underline{N} dois números *fuzzy*, com \underline{M} definido no conjunto dos reais do universo X e \underline{N} definido em uma linha real do universo Y . As operações aritméticas (+, −, ×, ÷) entre esses dois números são denotadas pelo símbolo *. Assim, uma operação aritmética entre esses dois números resulta em outro número *fuzzy* que estará definido no universo Z (ROSS, 2004). Essa operação pode ser expressa pela utilização do Princípio de Extensão de Zadeh por meio da Equação (3.19).

$$\mu_{\underline{M} * \underline{N}}(z) = \max_{x * y = z} [\min(\mu_{\underline{M}}(x), \mu_{\underline{N}}(y))] \quad (3.19)$$

O suporte para um número *fuzzy* \underline{M} é dado pela Equação (3.20).

$$\text{supp } \underline{M} = \{x \mid \mu_{\underline{M}}(x) > 0\} = M \quad (3.20)$$

A Equação (3.20) representa um intervalo, no conjunto dos reais, denotado por M . É possível encontrar um intervalo para o suporte de um número *fuzzy* resultante de uma operação aritmética, $\underline{M} * \underline{N}$ (Equação (3.21)), uma vez que, as operações entre números *fuzzy* (Equação (3.19)) geram um número *fuzzy*.

$$\text{supp } (z) = \underline{M} * \underline{N} \quad (3.21)$$

Na Seção 3.3.3, foi mostrado que o suporte de um conjunto *fuzzy* é igual ao seu valor de α -cut ($\alpha = 0^+$). Em geral, executam-se operações α -cut em números *fuzzy* para qualquer valor de α . A operação aritmética, $*$, para conjuntos α -cut é expressa pela Equação (3.22).

$$(\underline{M} * \underline{N})^\alpha = \underline{M}^\alpha * \underline{N}^\alpha \quad (3.22)$$

A Equação (3.22) mostra que uma operação aritmética ($*$ \equiv $\{+, -, \times, \div\}$) entre dois números *fuzzy* é equivalente para operação aritmética no respectivo α -cuts dos dois números *fuzzy*. Tanto $(\underline{M} * \underline{N})^\alpha$ quanto $\underline{M}^\alpha * \underline{N}^\alpha$ são quantidades intervalares, e manipulações dessas quantidades podem fazer uso de análises de intervalos clássicos (ROSS, 2004).

A multiplicação entre números *fuzzy* triangulares não resulta em um produto com uma função de pertinência triangular. Em virtude disso, foi utilizado o algoritmo DSW (DONG, SHAH e WONG, 1985 apud ROSS, 2004, p. 462) para gerar a função resultante da multiplicação.

3.5.1. Algoritmo DSW

Este tipo de algoritmo utiliza o conceito α -cuts para representar os números *fuzzy*. O algoritmo segue os passos abaixo (ROSS, 2004):

1. Selecione um valor α em que $0 \leq \alpha \leq 1$;
2. Encontre os intervalos na função de pertinência de entrada correspondente a esse α ;
3. Compute o intervalo da função de pertinência de saída para o nível de α -cut selecionado, utilizando operações de intervalos binários padrão;
4. Repita os passos 1-3 para diferentes valores de α para completar a representação α -cut da solução.

A presente pesquisa se baseou no algoritmo DSW para realizar a multiplicação entre os números *fuzzy*, pois utiliza todos os intervalos α -cut em uma análise padrão de

intervalo *fuzzy* e assim consegue-se obter todos os pontos da função de pertinência resultante.

3.5.2. Aritmética de Intervalos

Na Seção 3.2.3 foi apresentado que um conjunto *fuzzy* também pode ser pensado como um conjunto clássico com limites variáveis, ou seja, α -cut. Uma função de pertinência convexa que define um conjunto *fuzzy* pode ser descrita pelos intervalos associados com diferentes níveis de α -cut. Dessa forma, sejam dois números intervalares I_1 e I_2 definidos pelos pares ordenados de números reais com limites inferiores e superiores $[a, b]$ e $[c, d]$, respectivamente, expressos por (ROSS, 2004):

$$I_1 = [a, b] \quad \text{onde } a \leq b$$

$$I_2 = [c, d] \quad \text{onde } c \leq d$$

Quando $a = b$ e $c = d$, estes números de intervalo degeneraram a um número real escalar. Foi definido, na Seção 3.5, o símbolo $*$ ($*$ $\equiv \{+, -, \times, \div\}$) como uma operação aritmética genérica, sendo assim a Equação (3.23) expressa simbolicamente uma operação.

$$I_1 * I_2 = [a, b] * [c, d] \quad (3.23)$$

O resultado desta equação gera outro intervalo. O cálculo deste intervalo depende das magnitudes e dos sinais dos elementos a , b , c e d . O Quadro 3.1 mostra as combinações possíveis de operações de união e interseção de conjuntos de intervalos.

Quadro 3.1 – Operações de conjuntos de intervalos. Fonte: ROSS (2004).

Casos	Interseção (\cap)	União (\cup)
$a > d$	\emptyset	$[c, d] \cup [a, b]$
$c > b$	\emptyset	$[a, b] \cup [c, d]$
$a > c, b > d$	$[a, b]$	$[c, d]$
$c > a, d < b$	$[c, d]$	$[a, b]$
$a < c < b < d$	$[c, b]$	$[a, d]$
$c < a < d < b$	$[a, d]$	$[c, b]$

Baseado nas informações do Quadro 3.1, as quatro operações aritméticas para intervalo de adição, subtração, multiplicação e divisão estão expressas pelas Equações (3.24), (3.25), (3.26) e (3.27), respectivamente (KISHK e HAJJ, 2000):

$$[a, b] + [c, d] = [a + c, b + d] \quad (3.24)$$

$$[a, b] - [c, d] = [a - c, b - d] \quad (3.25)$$

$$[a, b] \cdot [c, d] = [\min(ac, ad, bc, bd), \max(ac, ad, bc, bd)], \text{ contanto que } 0 \notin [c, d] \quad (3.26)$$

$$[a, b] / [c, d] = [a, b] / \left[\frac{1}{d}, \frac{1}{c} \right] \quad (3.27)$$

Nas quais: ac , ad , bc e bd são produtos aritméticos e $1/d$ e $1/c$ são quocientes.

O intervalo aritmético também segue as propriedades de comutatividade e associatividade para somas e produtos, porém não segue a propriedade de distributividade. Quando se somam ou se multiplicam dois números reais, o resultado gera um número real. Quando se somam ou se multiplicam dois intervalos, executam-se essencialmente estas operações em um número infinito de combinações de pares de *singletons* clássicos de cada um dos valores limites dos dois intervalos. Desta forma, um intervalo é esperado como resultado. Assim, tem-se um número infinito de combinações de produtos entre dois intervalos, nos quais, são necessários apenas os limites inferior e superior dos intervalos para encontrar os pontos finais da solução (ROSS, 1995).

A aritmética *fuzzy* pode ser usada para desenvolver métodos para **agregação de opiniões de especialistas**, que são expressas em termos lingüísticos ou aproximados. Esse procedimento de agregação conserva incertezas nas opiniões subjacentes pela obtenção de uma opinião combinada *fuzzy*. A multiplicação e a divisão não produzem números *fuzzy* triangulares, e elas necessitam ser estimadas pelo uso de α -cuts.

Na presente dissertação é utilizada a operação aritmética de multiplicação entre números *fuzzy* e entre intervalos *fuzzy* para gerar o índice RPN *fuzzy*, e com isso, obter o

índice RPN clássico (Capítulo 2) referente à falha de um referido equipamento que é gerado pela multiplicação entre os índices Severidade, Ocorrência e Detecção.

3.6. Conceitos Básicos de Lógica Fuzzy

A lógica clássica é baseada em verdade absoluta ou mentira absoluta, ou seja, no par {verdadeiro, falso} ou {0, 1}. No entanto, para lidar com problemas do mundo real o conhecimento disponível pode ser paradoxal, incerto ou verdadeiro com uma determinada probabilidade. Desta forma, faz-se necessária uma extensão da lógica para alterar esse conjunto de valores de forma a permitir um tratamento melhor do conhecimento (AYYUB, 2001). Dentre os formalismos propostos para isso, tem-se a lógica *fuzzy* que é baseada nos conjuntos *fuzzy* (Seção 3.1).

Neste tópico são apresentados dois conceitos básicos da lógica *fuzzy* que são *fuzzificação* e *desfuzzificação*, abordados na sequência.

3.6.1. Fuzzificação

A *fuzzificação* é o processo de mapeamento dos valores das entradas em conjuntos *fuzzy* por meio de funções de pertinência associadas aos elementos originais das variáveis de entrada. Em outras palavras, é um processo no qual uma grandeza real é transformada em uma grandeza *fuzzy* com um grau de pertinência associado (ROSS, 2004).

Pode-se citar como aplicação prática, a tomada de decisão para gestão de manutenção preventiva em equipamentos que possam vir a falhar devido a incerteza dos dados utilizados na análise. Essa imprecisão pode ocasionar um resultado equivocado para a priorização da manutenção. Dessa forma, o processo de *fuzzificação* por meio de uma função de pertinência pode ser empregado para atribuir um grau de pertinência aos dados de entrada para verificar o comportamento dos mesmos em relação ao resultado esperado. Assim, a *fuzzificação* atribui valores de pertinência para as grandezas reais de forma a auxiliar à tomada de decisão.

3.6.2. Desfuzzificação

A *desfuzzificação* realiza o caminho inverso da *fuzzificação*, pois transforma um resultado *fuzzy* em um resultado real de acordo com o grau de pertinência associado (ROSS, 2004). Dessa forma, a *desfuzzificação* reduz a coleção de valores da função de pertinência gerada para uma única quantidade.

Para *desfuzzificar* operações realizadas entre números *fuzzy* utiliza-se o conceito de conjunto α -cut apresentado na Seção 3.3.3. Os conjuntos A^α convertem um conjunto *fuzzy* em um conjunto clássico utilizando níveis de α . A *desfuzzificação* de um escalar pode ser realizada por meio de diversos métodos de *desfuzzificação* que devem ser escolhidos de acordo com o tipo de problema e resultado esperado. Alguns desses métodos são: princípio de pertinência máxima (também chamado de método altura), centróide, média dos pesos, pertinência média dos máximos, centro das somas, centro da maior área e primeiro (ou último) dos máximos. Esses métodos podem ser vistos com mais detalhes em (ROSS, 2004; KLIR e YUAN, 1995; AYYUB, 2001; SIVANANDAM *et al.*, 2006).

3.7. Aplicação da Lógica Fuzzy à Metodologia Proposta

A aplicação da lógica *fuzzy* à metodologia FMEA clássica consiste basicamente de dois passos principais:

1. Seleção de uma função de pertinência *fuzzy* para modelar as variáveis dos índices do risco, e
2. *Desfuzzificação* do risco proveniente da falha.

A lógica *fuzzy* resolve as limitações do índice RPN ocorridas na metodologia FMEA clássica, além de permitir aos especialistas a combinação da Severidade, Ocorrência e Detecção dos modos de falha. Os principais componentes associados com o modelo são: *fuzzificação*, operação aritmética *fuzzy* (multiplicação), algoritmo DSW (multiplicação) e *desfuzzificação*. A Figura 3.9 ilustra o processo.

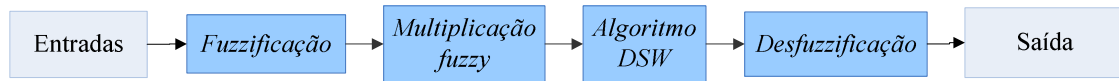


Figura 3.9 – Modelagem Fuzzy

As entradas da modelagem *fuzzy* correspondem aos parâmetros de Potência Não-Suprida (Severidade), FIC (%) (Ocorrência) e DIC (%) (Detecção). A saída corresponde ao risco estimado pelo índice RPN nos equipamentos devido à ocorrência das falhas.

3.8. Considerações Finais

A teoria da lógica *fuzzy* visa ajudar na tomada de decisões caracterizada por informações imprecisas. Foi empregada na metodologia proposta com o objetivo de resolver as informações imprecisas acerca da metodologia FMEA clássica que para valores diferentes de Severidade, Ocorrência e Detecção podem gerar como produto o mesmo valor para o índice RPN. A avaliação do índice RPN *fuzzy* é realizada pela priorização de causas de falha de um sistema de distribuição. Assim, no desenvolvimento da metodologia proposta utilizaram-se os conceitos apresentados neste capítulo. O Capítulo 4 apresentará a formalização das técnicas empregadas na metodologia proposta *FMEA-FUZZY*.

4. METODOLOGIA *FMEA-FUZZY* APLICADA A GESTÃO DOS INDICADORES INDIVIDUAIS DE ENERGIA: DIC E FIC

Neste capítulo é apresentada a metodologia proposta nesta dissertação, para aplicação na gestão dos indicadores de continuidade individuais: DIC e FIC. É ilustrada a modelagem de todos os índices que compõem o índice RPN (*Risk Priority Number*), assim como as funções de pertinência de acordo com os parâmetros discutidos para a metodologia FMEA e lógica *Fuzzy* nos capítulos anteriores.

4.1. Introdução

A metodologia *FMEA-FUZZY* proposta visa desenvolver um modelo matemático que auxilie no gerenciamento das metas contratuais de desempenho dos indicadores individuais de energia pelo especialista. Isso é realizado por meio da identificação dos modos de falha críticos e não-críticos de forma a manter as metas estipuladas pela ANEEL. Essa metodologia foi aplicada no desenvolvimento de um simulador via *web* em um projeto de pesquisa e desenvolvimento envolvendo a Universidade Federal de Santa Catarina e uma Concessionária brasileira. Esse simulador foi intitulado de: *Simulador de Projeções de Metas DIC e FIC utilizando Algoritmos FMEA e Lógica Fuzzy*. Dessa forma, a metodologia desenvolvida visa contemplar a gestão desses indicadores em relação às respectivas metas.

Para desenvolver a metodologia, dentre as ferramentas de gestão existentes na literatura, escolheu-se a técnica FMEA por identificar as falhas e classificá-las por meio de um sistema de priorização do risco (RPN) associado. Por outro lado, a técnica de

inteligência artificial (lógica *fuzzy*) foi escolhida para tratar dos problemas relacionados à incerteza acerca da metodologia FMEA clássica, como descrito na Seção 2.6.5. Foi realizada uma pesquisa acerca dessas duas técnicas (Capítulos 2 e 3) para que fosse possível dar um suporte básico à metodologia proposta.

Assim, propõe-se aplicar esta metodologia na identificação dos equipamentos que estão em situação mais crítica devido à ocorrência de falhas, sendo possível direcionar um plano de ações e melhorias para os sistemas/conjuntos a serem analisados. Pretende-se assim, evitar o pagamento de multas devido à violação de metas de DIC e FIC, conseqüentemente fazendo com que a empresa concessionária melhore a prestação de serviço aos seus consumidores.

A seguir, apresenta-se uma discussão do estado da arte em relação a aplicações da metodologia FMEA em conjunto com a lógica *fuzzy*.

4.2. Revisão sobre Aplicações de FMEA e Lógica *Fuzzy*

Nesta Seção é apresentada uma breve revisão bibliográfica acerca da Metodologia *FMEA-FUZZY* encontrada na literatura por meio de artigos técnicos.

Wang *et al.* (2008) desenvolveram uma metodologia *FMEA-FUZZY* para realizar a priorização de risco de falhas chamada de *Fuzzy Risk Priority Number* (FRPN). Para isso, os índices que compõem o índice de risco RPN foram tratados como variáveis *fuzzy* e avaliadas usando termos lingüísticos e graus *fuzzy*. Os FRPN foram definidos como pesos geométricos *fuzzy*, ou seja, graus *fuzzy* para Severidade, Ocorrência e Detecção que podem ser computados utilizando conjuntos α -cut e modelo de programação linear. Para modelar a Severidade, utilizou-se como parâmetro a severidade do efeito, a qual foi dividida em 10 conjuntos de variáveis lingüísticas. Para Ocorrência, utilizou-se como parâmetro a probabilidade de ocorrência de falhas, a qual foi dividida em 5 conjuntos de variáveis lingüísticas. Para a Detecção, utilizou-se como parâmetro a possibilidade de detecção de falha pelo controle de projeto, a qual foi dividida em 10 conjuntos de

variáveis lingüísticas. Os pesos *fuzzy* foram divididos em 5 conjuntos de variáveis lingüísticas.

Em muitas aproximações de *FMEA-FUZZY* publicadas na literatura foi empregado o conceito base de regras *fuzzy* “Se-Então” para o estudo de priorização de falhas. Porém, os autores Wang *et al.* (2008) afirmam que esse conceito é inapropriado para a priorização, pois requer muito conhecimento e opiniões do especialista. Geralmente, uma base de regra completa pode consistir de 100 regras (ou mais) e torna-se inviável pedir a um especialista que realize centenas de julgamentos. Essa base de regras pode ser reduzida, mas pode causar problemas como conclusões errôneas devido a diferentes opiniões entre especialistas para poucas regras. Outro motivo é que a redução da base de regras deixará a base incompleta e, com isso, as inferências serão imprecisas, devendo ser evitada. Com isso, fica clara a necessidade de desenvolver uma metodologia que não precise tanto da opinião dos especialistas que foi a proposta do artigo de Wang *et al.* (2008).

Em virtude da dificuldade em adquirir a avaliação precisa de informação em relação aos índices S, O e D da FMEA, como também a dificuldade de se construir uma base de regras *fuzzy* completa, os autores propuseram uma nova metodologia *FMEA-FUZZY* de forma a permitir que esses índices e seus pesos relativos fossem avaliados de forma lingüística em vez de um RPN clássico, ou regras *fuzzy* “Se-Então”, a serem definidas para priorização dos modos de falha. O RPN *fuzzy* ou o FRPN foi definido como a média geométrica de pesos *fuzzy* dos índices de risco e pode ser resolvido usando conjuntos α -cut e o Princípio de Extensão de Zadeh. O conjunto α -cut de FRPNs é fácil de ser gerado resolvendo uma série de modelos de programação linear. Os FRPNs foram *desfuzzificados* utilizando o método de *desfuzzificação* centróide, no qual uma nova forma de *desfuzzificação* foi baseada em uma formulação derivada de conjuntos α -cut. Mostrou-se que a metodologia *FMEA-FUZZY* proposta forneceu uma maneira útil, prática, eficaz e flexível para avaliação de risco da metodologia FMEA. Em particular, o FRPN definido ofereceu uma nova maneira para priorização dos modos de falha em FMEA. A metodologia desenvolvida trata uma abordagem inédita da metodologia *FMEA-FUZZY* com a utilização de média geométrica de pesos.

Guimarães e Lapa (2007) aplicaram a metodologia *FMEA-FUZZY* para calcular o risco de equipamentos de um sistema de resfriamento CSS (*Containment Cooling System*) de uma usina nuclear. O objetivo dos autores era encontrar os equipamentos mais críticos (possibilidade de falhar) para que fosse dada prioridade da manutenção preventiva destes equipamentos, visto que, por se tratar de uma usina nuclear, não é admitido à possibilidade de uma falha ocorrer de fato, dada a gravidade que esta falha acarretaria.

Guimarães e Lapa (2007) modelaram as variáveis lingüísticas da lógica *fuzzy* em 5 diferentes grupos: remoto, baixo, moderado, alto e muito alto. Estas variáveis foram utilizadas nos três índices da metodologia FMEA (Severidade, Ocorrência e Detecção). Foi utilizado o software Matlab (módulo *toolbox fuzzy*) para modelar todos os conjuntos de regras. Este conjunto consiste em regras do tipo “Se-Então”, conforme o exemplo a seguir.

“Se a Severidade é ALTA, a Ocorrência é MODERADA e a Detecção é MODERADA, então o risco é MODERADO-ALTO.”

Também foi utilizado o método de inferência Mamdani (ROSS, 2004) - na *fuzzificação* e o método centróide para *desfuzzificação*. Conforme citado acima, esta modelagem foi aplicada ao sistema de resfriamento de uma usina nuclear sendo estabelecida uma ordenação dos equipamentos mais críticos, pois é sabido que o resfriamento de uma central nuclear é de vital importância na operação segura de tais sistemas. Esta ordenação foi comparada com a ordenação encontrada na metodologia FMEA clássica, a qual é avaliada por meio do índice RPN sendo obtidos resultados diferentes. Os autores atribuem esta diferença ao fato da metodologia FMEA clássica não conseguir expressar a diferença entre os graus de risco, em função da importância de cada um dos três índices (Detecção, Ocorrência e Severidade). Desta forma os autores concluem que a metodologia *FMEA-FUZZY* expressa melhor o risco que cada equipamento pode gerar para uma falha no sistema CSS, sendo esta nova abordagem promissora para outros tipos de aplicação.

Em Chin *et al.* (2007) foi abordada a utilização da metodologia *FMEA-FUZZY* aplicada nos estágios iniciais de um processo de desenvolvimento de produtos. A idéia dos autores era conseguir avaliar as alternativas dos usos de materiais na fase inicial de um projeto, para desta forma escolher as melhores alternativas.

A metodologia FMEA é bastante usual para encontrar as relações de causas e efeitos, porém os autores comentam que em várias situações não é possível quantificar facilmente, ou em alguns casos é impossível fazer quantificações sobre a influência de determinada causa através dos índices clássicos: Severidade, Ocorrência e Detecção da FMEA. Desta forma, os autores resolveram aplicar a lógica *fuzzy* para tentar quantificar por meio de variáveis lingüísticas a opinião dos especialistas e assim, calcular o risco, que neste caso se traduz em alternativas dos usos possíveis de materiais na concepção de um projeto.

A metodologia proposta por eles foi aplicada dentro de um contexto de desenvolvimento de produtos chamada de EPDS (*Expert Product Development System*), o qual consiste em uma seqüência de passos que a equipe de desenvolvimento deve executar. O trabalho dos autores foi incluir em uma das etapas da metodologia FMEA a lógica *fuzzy*, para modelar o risco de maneira lingüística pelos especialistas, e esta foi chamada de EPDS – 1.

Desta forma, Chin *et al.* (2007) separam as variáveis lingüísticas em 8 conjuntos, e as modelaram através de funções triangulares e trapezoidais. Foi utilizado o Princípio de Extensão de Zadeh na modelagem de cada um dos índices da FMEA e foi aplicado o EPDS – 1 no desenvolvimento de um micro-motor elétrico aplicado em modelos comerciais de impressoras a laser. Os resultados foram bastante promissores. Devido ao resultado final do projeto, conseguiu-se um motor com confiabilidade próxima a versões similares, porém a um custo mais reduzido.

Zafiroopoulos e Dialynas (2005) desenvolveram uma metodologia para prever a confiabilidade de componentes eletrônicos utilizando a metodologia FMECA junto com a lógica *fuzzy*. Eles utilizaram o documento técnico MIL-HDBK-217F N2 (DOD, 1991), o

qual define características gerais a serem observadas para a previsão das taxas de falhas de componentes eletrônicos. Estas características incluem estimativas baseadas em testes de *stress* nos componentes, principalmente em função da temperatura, corrente e voltagem.

Os autores utilizaram a metodologia FMECA baseada no documento MIL-HDBK-1629A (DOD, 1980), o qual determina os seguintes passos:

- (1) Definição do sistema;
- (2) Análise das funcionalidades do sistema;
- (3) Identificação dos possíveis modos de falhas e seus efeitos;
- (4) Classificação da severidade de uma determinada falha;
- (5) Classificação da frequência de ocorrência de uma determinada falha e análise da criticidade dos modos de falhas.

A análise através da metodologia FMECA inicia-se de “baixo para cima” avaliando falhas nos níveis mais baixos do sistema e subindo até os níveis mais altos. A ordenação dos riscos dos componentes pode ser encontrada por meio de análise qualitativa, visto que muitas vezes é extremamente difícil calcular determinadas probabilidades. Por esta razão os autores resolveram utilizar a técnica de inteligência artificial, lógica *fuzzy*, para as mensurações quantitativas das análises realizadas pelos engenheiros de forma qualitativa (variáveis lingüísticas).

A criticidade na metodologia FMECA é calculada por meio de 4 parâmetros (Beta, Alfa, Gama e t) e tem como variáveis lingüísticas a probabilidade do efeito da falha (extensão do efeito na falha no sistema), taxa do modo de falha, probabilidade de falha de um componente e o tempo de exposição à falha (tempo de funcionamento do sistema), respectivamente. Este último parâmetro pode ser desconsiderado na modelagem *fuzzy*, devido à busca de uma classificação entre os componentes mais críticos, sendo o tempo de exposição igual para todos.

Para a modelagem *fuzzy* da Severidade foram utilizadas 4 variáveis lingüísticas (nenhum, marginal, crítico e catastrófico). Foram utilizadas funções triangulares para

todas as variáveis. Os 3 parâmetros (Beta, Alfa e Gama) utilizados no cálculo da criticidade foram modelados da seguinte forma: para o Beta foram aplicadas 4 variáveis lingüísticas (sem efeito, possível perda de função, provável perda de função e perda da função no sistema), para o Alfa também foram modeladas outras 4 variáveis lingüísticas (remota, provável, freqüente e dominante) e para o parâmetro Gama foram modeladas 5 variáveis lingüísticas (nenhum, baixo, moderado, alto e muito alto).

Os autores aplicaram esta metodologia no projeto de uma fonte chaveada, na qual foram agrupados todos os componentes: resistores, transformadores, acopladores ópticos, diodos, capacitores, um transistor e um CI. Utilizando os dados do documento MIL-HDBK-217F N2 (DOD, 1991), foi possível fazer previsões sobre as taxas de falhas de cada componente. Esses dados foram utilizados como a entrada na metodologia *FMECA-FUZZY*, a qual foi utilizada para calcular o risco de cada componente, sendo o acoplador óptico o componente de maior risco para a falha da fonte chaveada.

SHARMA *et al.* (2005) abordaram a utilização da metodologia FMEA junto com a lógica *fuzzy* por meio de variáveis lingüísticas. O objetivo dos autores foi encontrar uma metodologia que fosse mais sensível às variações de subjetividade utilizadas na aplicação da metodologia FMEA clássica e desta forma encontrar valores de RPN que representam melhor o risco associado a cada modo de falha encontrado.

Os autores testaram esta metodologia na indústria de papel e celulose em sistemas hidráulicos. Utilizaram a análise de bancos de dados, o conhecimento de especialista e outras fontes para determinar um conjunto de regras utilizadas para cada um dos índices utilizados na metodologia FMEA (Severidade, Ocorrência e Detecção). Foram também utilizados os elementos lingüísticos para toda modelagem, a qual foi classificada em 5 grupos distintos: remota, baixa, moderada, alta ou muito alta. Para o índice Ocorrência o parâmetro utilizado foi o MTBF (tempo médio entre falhas); para o índice Detecção foram questionados os especialistas para determinar o parâmetro e para cada falha foi definindo um valor entre 0% e 100% sobre a “facilidade” de se encontrar determinada falha e, finalmente, para o índice Severidade foi utilizado como parâmetro o MTTR (tempo médio para reparar a falha).

Para a *fuzzificação* foram utilizadas 6 regras: não importante, pequeno, baixo, moderado, importante e muito importante, e estas classificações foram modeladas pelas funções de pertinência trapezoidal e triangular. Foi utilizado novamente o método de inferência Mamdani (ROSS, 2004), sendo que os autores mostraram nos resultados que houve uma diferença nas ordenações estabelecidas pela metodologia FMEA clássica e pela metodologia *FMEA-FUZZY*. Os autores demonstraram que esta nova abordagem não apenas resolvia a questão do RPN ter o mesmo valor para diferentes modos de risco, como também aumentou a sensibilidade dos gestores para informações mais imprecisas.

Chang *et al.* (1999) aplicaram a metodologia FMEA clássica junto com a teoria *Grey*. Esta é utilizada para encontrar relações de incerteza dentro de um sistema, ou seja, a relação *Grey* analisa e determina o grau de influência entre fatores ou simplesmente mensura a contribuição dos fatores no comportamento principal analisado.

Para converter grandezas lingüísticas definidas pela FMEA em grandezas numéricas, os autores aplicaram a lógica *fuzzy*, devido ao fato da teoria *Grey* necessitar para a sua utilização apenas grandezas numéricas. A aplicação de lógica *fuzzy* se deu por meio de funções de pertinência triangulares aplicadas ao método do Princípio de Extensão de Zadeh. A teoria *Grey* tem como objetivo suprir uma das falhas da metodologia FMEA que é a falta de um critério de importância relativa entre os índices Severidade, Ocorrência e Detecção. Conforme já citado, tradicionalmente é possível que dois modos de falhas possuam o mesmo RPN, e conseqüentemente o mesmo risco. Com a aplicação da teoria *Grey* foi possível estabelecer (sem a necessidade de uma função objetivo, apenas utilizando os resultados obtidos na aplicação da metodologia FMEA clássica) as relações (pesos) entre os três índices usados na metodologia FMEA clássica.

Os autores concluem o artigo com um exemplo meramente ilustrativo da aplicação da metodologia proposta, demonstrando como a teoria *Grey* determina os pesos entre os três componentes da metodologia FMEA e assim fornecem uma ordenação diferente do que foi obtido utilizando a FMEA clássica. Segundo os autores, esta ordenação priorizaria melhor os riscos das causas analisadas. VAZ *et al.* (2006) também

aplicaram a metodologia *Grey* com FMEA para analisar causas de falhas em sistema elétrico de distribuição a qual resolve alguns casos específicos.

4.3. Descrição da Metodologia Proposta *FMEA-FUZZY*

A metodologia proposta *FMEA-FUZZY* foi desenvolvida com objetivo de fazer uma estimativa de risco associado às falhas relacionadas na formação dos indicadores DIC e FIC. Isto auxiliará a decisão do gestor em relação à priorização de manutenção nos transformadores de distribuição de uma rede de energia elétrica, observando as metas dos indicadores individuais de cada equipamento. Essa metodologia possui uma base de dados reais fornecidos por uma concessionária brasileira, e a modelagem foi dividida em três partes: modelagem FMEA, modelagem *Fuzzy* e modelagem *FMEA-FUZZY*.

4.3.1. Modelagem FMEA

A metodologia FMEA clássica usa uma escala discreta, que pode variar de 1 a 10, para mensurar os índices S, O e D. Nesta dissertação foi realizada uma adaptação dessa escala de acordo com os parâmetros analisados na pesquisa. Assim, tem-se para Severidade uma escala que varia de 1 a 3, para Ocorrência e Detecção uma escala que varia de 1 a 8, nas quais, quanto maior for o índice maior será o valor na escala e pior é a qualidade da rede de distribuição. Estas escalas foram definidas por meio da elicitación do conhecimento entre as equipes da universidade e da concessionária.

Os parâmetros e intervalos para cada índice do RPN (Severidade, Ocorrência e Detecção) foram elucidados por uma equipe de especialistas, sendo feita de acordo com a necessidade da gestão dos indicadores. O parâmetro Potência Não-Suprida para o índice Severidade foi dividido em três conjuntos pelo fato de haver pouca variação dos valores de potência nominal dos transformadores utilizados pelas concessionárias no sistema de distribuição de energia. Os parâmetros FIC (%) e DIC (%) dos índices Ocorrência e Detecção, respectivamente, foram divididos em 8 conjuntos dos quais, 5 correspondem a conjuntos para metas não violadas e 3 para metas violadas, essa divisão se deu devido aos padrões de classificação das metas utilizados pela concessionária. As Tabelas 4.1, 4.2 e

4.3 apresentam as escalas utilizadas, assim como, os parâmetros atribuídos a cada índice, conforme descrito a seguir.

Para o índice Severidade, foi primeiramente definido como parâmetro a penalidade sofrida pela concessionária por ultrapassagem de metas de DIC e FIC. Porém, o número de faltas ocorridas foi insuficiente para realizar a modelagem com estas penalidades, uma vez que, na maioria dos casos, as metas são atendidas. Assim, as faltas ocorridas não ultrapassaram as metas, não gerando penalidades.

Atualmente as concessionárias são penalizadas pelo órgão regulador com relação às multas de indicadores de continuidade de conjunto: DEC e FEC⁶. Mas, há uma forte tendência de que a multa seja mais pontual, ou seja, que passe a ser mensurada pelos indicadores individuais de energia: DIC, DMIC⁷ e FIC. Assim, é possível garantir ao consumidor individual uma maior confiabilidade e qualidade no serviço recebido. No primeiro caso, a penalidade da concessionária deve ser acertada com a ANEEL, e no segundo caso, a penalidade se dá pelo pagamento da mesma na fatura do mês seguinte do consumidor prejudicado como forma de crédito.

Após verificar que não seria possível modelar a Severidade pelo parâmetro penalidade, definiu-se como parâmetro a Potência Não-Suprida pelo equipamento durante o momento da falta. Isso impacta tanto para os consumidores como para a concessionária, pois o consumidor pode ser obrigado a interromper suas atividades contra sua vontade, atividades essas que podem ser vitais àqueles que dependem da energia por alguma deficiência fisiológica e a concessionária sofre pela perda de receita pela energia que deixou de ser vendida e pela possível penalidade que possa vir a sofrer de acordo com a ultrapassagem ou não das metas dos indicadores de energia.

Considerando o contexto, a seguir são descritos os parâmetros atribuídos aos índices que compõem o índice RPN. Para esses parâmetros não foram definidos valores máximos para os limites das escalas, pois esses valores podem variar de acordo com os

⁶ Esses indicadores podem se referir a uma distribuidora, município, bairro, etc.

⁷ Não foi utilizado o indicador DMIC por este ser uma extrapolação do indicador DIC. DMIC representa o tempo máximo de interrupção contínua para uma determinada unidade consumidora.

dados utilizados, então os valores máximos de cada índice correspondem aos valores máximos encontrados nas simulações de acordo com os dados de entrada.

a) Severidade

Foi atribuído para o índice Severidade o parâmetro Potência Não-Suprida (kVA), a qual corresponde ao valor da potência nominal do transformador de distribuição afetado por um determinado modo de falha. Isso implica o não fornecimento de energia aos consumidores ligados a esse equipamento durante a falha, a qual afeta diretamente a satisfação dos clientes e o faturamento da concessionária. Esse parâmetro foi estratificado em três conjuntos, conforme Tabela 4.1, sendo que para a escala de valores dos conjuntos foram utilizados os valores de potência praticados na rede de distribuição que vão até 750 kVA.

Tabela 4.1 – Escala para o índice Severidade.

Severidade (S)		
Potência Não Suprida (kVA)	Grau	Severidade de Falha
$0 \leq S \leq 75$	1	Baixa
$76 \leq S \leq 150$	2	Média
$151 \leq S \leq 750$	3	Alta

b) Ocorrência

Para o índice Ocorrência foi atribuído o parâmetro FIC (%) que corresponde a uma relação percentual entre o valor de FIC ocorrido e a sua meta estipulada pela ANEEL para o período. Escolheu-se o indicador FIC por mensurar a frequência da ocorrência de uma determinada falha em cada consumidor e o FIC percentual por representar melhor os dados do problema em nível de gestão, uma vez que os dados são armazenados em números de vezes que ocorreu a falha. Foram modelados oito conjuntos para esse parâmetro, de acordo com a Tabela 4.2, onde na primeira coluna têm-se os valores percentuais dos conjuntos, na qual valores até 100% estão dentro da meta e acima disso, a meta está sendo violada. O valor máximo estipulado para violação, a título de ilustração, foi de 165 %.

Tabela 4.2 - Escala para o índice Ocorrência.

Ocorrência (O)		
FIC (%)	Grau	Ocorrência de Falha
$0 \leq O \leq 15$	1	Excelente
$16 \leq O \leq 35$	2	Ótimo
$36 \leq O \leq 55$	3	Muito Bom
$56 \leq O \leq 75$	4	Bom
$76 \leq O \leq 100$	5	Precário
$101 \leq O \leq 105$	6	Pouco Violado
$106 \leq O \leq 125$	7	Moderadamente Violado
$126 \leq O \leq 165$	8	Fortemente Violado

c) Detecção

Para o índice Detecção foi atribuído o parâmetro DIC (%) que corresponde ao valor percentual do DIC (duração da falha) em relação à sua meta estipulada pela ANEEL em um determinado período. O indicador de continuidade individual DIC foi atribuído à Detecção por mensurar a duração da falha em cada consumidor. Na FMEA clássica o parâmetro atribuído a esse índice corresponde à probabilidade de se detectar a falha. Este parâmetro é bastante aplicado em sistemas de controle de produção industrial e no caso em estudo se quer detectar o tempo no qual o consumidor ficou privado de energia, então para o índice Detecção foi feita uma adaptação do parâmetro para verificar a duração da falha.

Da mesma forma que na Ocorrência, optou-se por trabalhar com o valor percentual do indicador DIC para uma melhor representação do parâmetro no problema da gestão do mesmo. Também foram modelados oito conjuntos para esse parâmetro de acordo com a Tabela 4.3, onde na primeira coluna têm-se os valores percentuais dos conjuntos, na qual valores até 100% estão dentro da meta e acima disso, a meta está sendo violada. O valor máximo estipulado para violação, a título de ilustração, foi de 165 %.

Tabela 4.3 – Escala para o índice Detecção.

Detecção (D)		
DIC (%)	Grau	Detecção da Falha
$0 \leq D \leq 15$	1	Excelente
$16 \leq D \leq 35$	2	Ótimo
$36 \leq D \leq 55$	3	Muito Bom
$56 \leq D \leq 75$	4	Bom
$76 \leq D \leq 100$	5	Precário
$101 \leq D \leq 105$	6	Pouco Violado
$106 \leq D \leq 125$	7	Moderadamente Violado
$126 \leq D \leq 165$	8	Fortemente Violado

Observou-se que a utilização dos valores percentuais de DIC e FIC pode facilitar as possíveis mudanças nas escalas em relação aos valores ocorridos desses indicadores.

4.3.2. Modelagem Fuzzy

A aplicação da lógica *fuzzy* na metodologia proposta tem como objetivo auxiliar o especialista na tomada de decisões caracterizada por informações imprecisas da FMEA clássica, sendo deste modo resolvidas as limitações durante o cálculo e a hierarquização do índice RPN (Seção 2.6.5). Esta aplicação pode ser dividida em duas partes principais:

- Seleção de uma pertinência *fuzzy* para avaliar RPNs repetidos;
- *Desfuzzificação* da função de pertinência.

Os principais operadores associados com esta modelagem são: *fuzzificação* de entradas, algoritmo DSW, operação aritmética *fuzzy* de multiplicação, conjuntos α -cut e *desfuzzificação*, conforme descritos no Capítulo 3.

As entradas que compõem o índice do risco (RPN) foram *fuzzificadas* utilizando as funções de pertinência triangular e trapezoidal (Figuras 4.1, 4.2 e 4.3). Essas funções, dentre as existentes foram as que melhor se adequaram a modelagem do problema da presente pesquisa e também são as mais utilizadas nas mais diversas aplicações e representam adequadamente a variabilidade dos parâmetros (de acordo com os especialistas).

A modelagem *fuzzy* provê uma maior flexibilidade à modelagem FMEA para avaliar o risco associado aos modos de falha dos equipamentos. Os índices Severidade, Ocorrência e Detecção da metodologia FMEA são *fuzzificados* usando as funções de pertinências triangular e trapezoidal para determinar o grau de pertinência a cada parâmetro de entrada: Potência Não-Suprida (kVA), FIC (%) e DIC (%). Após o processo de *fuzzificação* as entradas *fuzzy* são multiplicadas entre si, por meio da operação aritmética de multiplicação *fuzzy* para determinar o nível de criticidade/risco associado à uma determinada falha. A saída *fuzzy* é então *desfuzzificada* utilizando o conceito de conjuntos α -cut e o critério de mínimo dos máximos⁸ gerando o valor do risco (RPN). A avaliação do risco *fuzzy* é realizada pela priorização de causas de falha em sistemas de distribuição.

Na *fuzzificação* das entradas é atribuído um grau de pertinência no intervalo [0, 1] a cada variável. A partir daí, obtém-se a função de pertinência para os índices Severidade, Ocorrência e Detecção conforme Figuras 4.1, 4.2 e 4.3.

a) Severidade: Potência Não-Suprida (kVA)

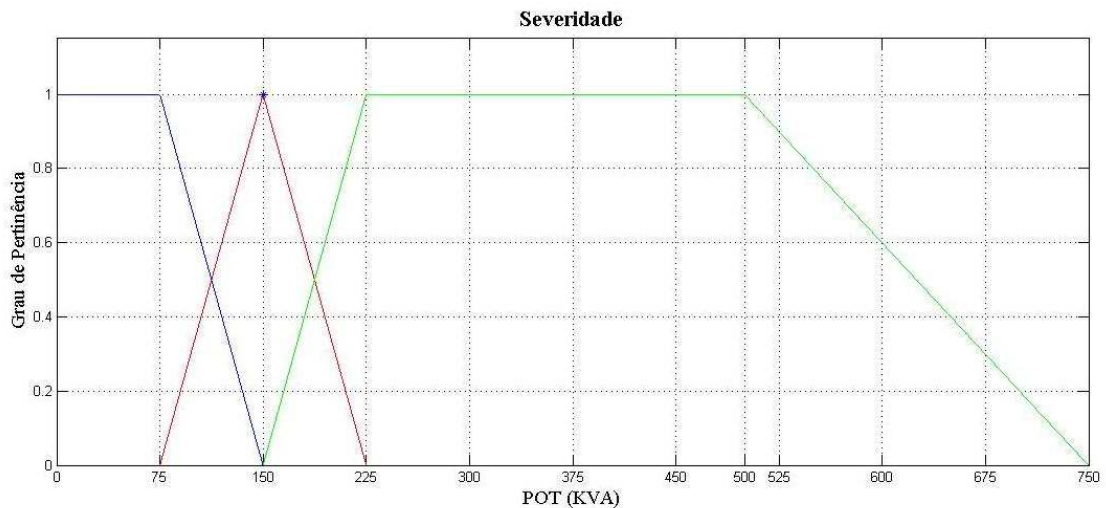


Figura 4.1 – Função de pertinência para entrada Potência Não-Suprida (kVA).

⁸

Esse critério foi utilizado com intuito de se estimar o menor risco possível.

b) Ocorrência: FIC (%)

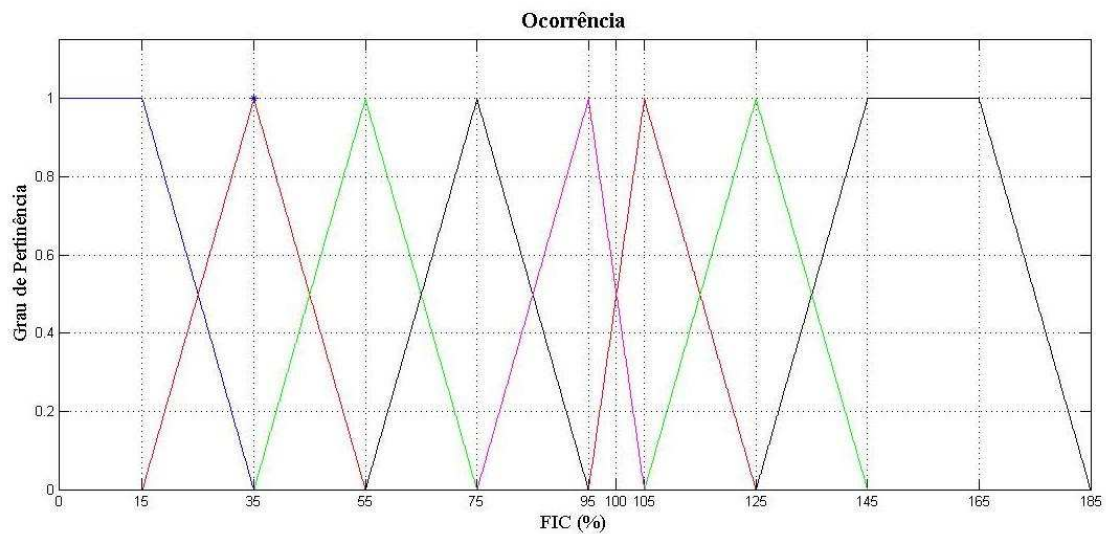


Figura 4.2 – Função de pertinência para entrada FIC (%)

c) Detecção: DIC (%)

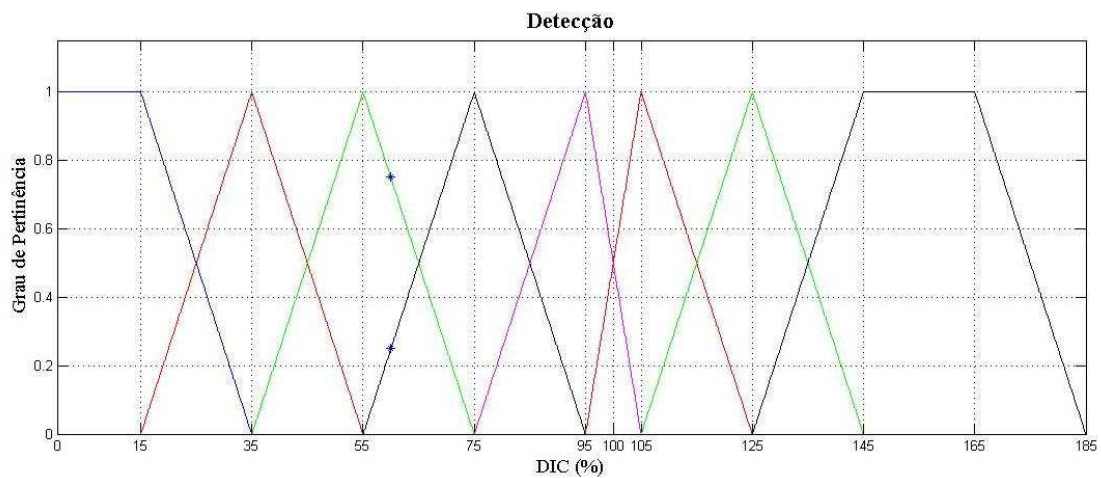


Figura 4.3 – Função de pertinência para entrada DIC (%)

Os valores do eixo x, de cada gráfico, representam os intervalos dos conjuntos elucidados nas reuniões como definidos nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3. Esses valores são representados por números *fuzzy* que representam o conjunto dos números reais para facilitar o cálculo das operações.

4.3.3. Modelagem FMEA-FUZZY

A metodologia proposta utiliza a lógica *fuzzy* para mapear as opiniões dos especialistas por meio de funções de pertinência, que estão associadas a cada um dos atributos considerados na análise. A lógica *fuzzy* também permitiu observar a transição das faixas de valores de um conjunto para outro. Além disso, leva em consideração o grau de pertinência (Seção 3.3.1) para resolver um problema encontrado na metodologia FMEA clássica relativo à imprecisão dos resultados nos quais diferentes valores de Severidade, Ocorrência e Detecção podem gerar índices RPN de mesmo valor.

Como citado anteriormente, a modelagem FMEA-FUZZY foi aplicada a um simulador idealizado em um projeto de pesquisa e desenvolvimento. Este simulador foi intitulado de “Simulador de Projeções de Metas DIC e FIC Utilizando Algoritmo FMEA e Lógica Fuzzy” (ARAÚJO *et. al.*, 2008), no qual, a metodologia corresponde ao módulo: *Estimativa de Risco*. Este módulo recebe como entrada de dados uma lista de equipamentos com participação na formação dos indicadores de continuidade individuais de energia. Após estimar o risco, nesse módulo é realizada uma ordenação dos modos de falha ocorridos, assim como, dos equipamentos mais afetados. Com isso, é possível obter os pontos mais críticos do sistema proporcionando ao gestor um suporte para direcionar a prioridade de melhoria no sistema (manutenção) a partir desses pontos da distribuição. Através desta maneira de estimar o risco, obtém-se uma maior flexibilidade para avaliar o risco associado com o componente dos modos de falha.

A metodologia FMEA-FUZZY está representada pelos passos do algoritmo a seguir, também apresentado na Figura 4.4:

- 1) Entrar com os valores de Potência Não-Suprida, FIC e DIC ocorridos em cada falha;
- 2) Calcular as percentagens dos valores de entrada em relação às metas de DIC e FIC;
- 3) *Fuzzificar* as entradas - verificar para os dados de entrada quais números *fuzzy* foram “ativados”, ou seja, possuem um grau de pertinência maior que zero;

- 4) Obter o produto RPN_{fuzzy} para todos os números *fuzzy* “ativados” e *desfuzzificá-lo* identificando o par [risco, grau de pertinência];
- 5) Encontrar o risco máximo;
- 6) Repetir os passos de 1 a 5 para as falhas ocorridas em equipamentos distintos durante um determinado período de estudo;
- 7) Realizar uma ordenação dos riscos das falhas;
- 8) Identificar equipamentos com maior valor do índice RPN total calculado pelo somatório das falhas ocorridas no equipamento.

Ao *fuzzificar* as entradas (Passo 3) ocorre a ativação do número *fuzzy* com o grau de pertinência correspondente. O número ativado corresponde a uma pertinência com grau maior que zero. Dependendo do valor da entrada, esta pode estar contida em um ou dois conjuntos e, com isso, podem ser ativados dois números *fuzzy* com graus de pertinência diferentes.

No Passo 4, é realizada uma combinação dos números ativados para obter o(s) produto(s) RPN_{fuzzy} por meio do algoritmo DSW (Capítulo 3). Após, é realizada a *desfuzzificação* dos riscos parciais por meio da aplicação dos conjuntos α -cut, de acordo com o Princípio de Extensão de Zadeh. Para cada risco *desfuzzificado* é identificado o par [risco, grau de pertinência]:

$$\left[risco_a, \mu_{RPN_parcial}(risco_a); risco_c, \mu_{RPN_parcial}(risco_c) \right] \quad (4.1)$$

Os valores correspondentes a esse par são armazenados em uma tabela com os **limites inferior** (La) e **superior** (Lc), gerados pelos conjuntos α -cut, e os valores de pertinências correspondentes. Então, utilizando o critério *fuzzy* de mínimo dos máximos na tabela gerada anteriormente, encontra-se o valor do risco RPN parcial final e com isso é gerada uma nova tabela contendo os valores de RPNs parciais finais e a pertinência.

$$\left[risco_p, \mu_{RPN_parcial_final}(risco_p) \right] \quad (4.2)$$

Finalmente, é realizada uma ordenação desses riscos parciais finais para determinar o risco máximo. Utilizando o critério de máximo (Passo 5) tem-se o risco final que corresponde ao RPN final para a falha analisada, conforme mostra a Equação 4.3.

$$\left[risco_{final}, \mu_{RPN_final} (risco_{final}) \right] \quad (4.3)$$

Realizado o processo descrito acima, repetem-se os passos de 1 a 5 para falhas distintas ocorridas em equipamentos distintos durante um determinado período de estudo. Esse processo é repetido para todos os equipamentos para um período desejado de análise e para cada conjunto selecionado. Ao final é realizada uma ordenação do risco para cada falha e total (somando-se os riscos por equipamento). Desta forma, são identificados os equipamentos que participaram significativamente para os indicadores DIC e FIC. O algoritmo apresentado foi implementado no Matlab (versão 7.1) para obtenção dos resultados no Capítulo 5.

4.4. Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a metodologia proposta, assim como, a modelagem de seus parâmetros. Esses parâmetros foram definidos em reuniões com a equipe de especialistas, sendo a composição dessa equipe de trabalho um passo importante na metodologia FMEA, pois conforme for a interpretação realizada pelo especialista em relação à Severidade, pode-se encontrar diferenças importantes no resultado final. Isso se deve a grande sensibilidade da metodologia *FMEA-FUZZY*. Inicialmente interpretou-se para Severidade o parâmetro de penalidade, mas devido à insuficiente ocorrência de falhas no banco de dados não houve penalidades suficientes para que esta modelagem fosse efetivada. Então, como segunda opção, utilizou-se a Potência Não-Suprida que é proporcional a energia que deixou de ser fornecida ao consumidor no período de falta.

5. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

Neste capítulo é realizada uma abordagem geral a respeito do caso de aplicação da metodologia desenvolvida no Capítulo 4, a qual foi aplicada a um sistema de distribuição de energia elétrica de uma concessionária brasileira. É apresentado um exemplo descritivo dos procedimentos metodológicos, os tipos de dados utilizados para o estudo e o estudo de caso. O cálculo de risco é realizado tanto para cada equipamento, quanto para cada modo de falha.

5.1. Introdução

Esse capítulo contempla a aplicação da metodologia desenvolvida *FMEA-FUZZY* conforme apresentada no Capítulo 4. O estudo realizado prioriza o risco modelado no sistema de distribuição, para isto é necessário transformar os critérios do gestor de forma quantificada, possibilitando otimizar os recursos financeiros da manutenção de forma mais efetiva. Assim, a concessionária pode se adequar à legislação e garantir uma maior qualidade e confiabilidade aos consumidores. A metodologia *FMEA-FUZZY* visa à gestão de indicadores de continuidade individuais de energia elétrica (DIC e FIC) em relação às respectivas metas, por meio de uma ordenação de equipamentos (transformadores) que causaram maior impacto nesses indicadores devido à ocorrência dos vários modos de falha.

Desta forma, é realizado um controle desses indicadores pela intensificação da manutenção nos equipamentos que foram considerados mais críticos pela classificação do *Risk Priority Number* (RPN). Foram utilizados dados de transformadores de distribuição para análise por ser o equipamento da rede de distribuição com os mesmos valores de DIC e o FIC de um subconjunto de consumidores, ou seja, os dados de DIC e FIC do

consumidor são os mesmos daquele do transformador ao qual está conectado. Assim, é possível identificar os equipamentos que estão com problema decorrente de falhas.

Para cada equipamento se tem o registro das causas de falhas ocorridas, informações de magnitude de DIC e FIC, a demanda de potência fornecida aos consumidores, entre outras informações. A mensuração desses indicadores individuais (Anexo A) se baseia na duração e frequência das interrupções no fornecimento ocorridas no sistema afetando unidades consumidoras. Para a realização da presente pesquisa não foi necessário calcular seus valores, pois a concessionária os forneceu.

5.2. Descrição da Base de Dados

A aquisição dos dados foi realizada por meio de captação dos mesmos junto ao banco de dados da concessionária em estudo. Foi considerado, para análise, o período trimestral para a gestão das metas por equipamento. Os dados fornecidos correspondem aos consumidores do tipo comercial, contudo poderiam ser analisados quaisquer tipos de consumidores e períodos mensais ou anuais.

A base de dados utilizada para realização do estudo de caso foi composta pelos seguintes dados:

- Número de identificação dos transformadores;
- Potência nominal dos transformadores de distribuição;
- Causas de falhas ocorridas em cada transformador;
- Data de ocorrência;
- Valores de DIC ocorridos;
- Valores de FIC ocorridos;
- Metas trimestrais para os indicadores DIC e FIC.

Os valores de DIC e FIC foram representados por DIC (%) e FIC (%), que mensuram a relação percentual entre os valores ocorridos de DIC e FIC e suas respectivas metas.

5.3. Exemplo Hipotético da Metodologia *FMEA-FUZZY*

Nesta Seção é ilustrado um exemplo descritivo e hipotético de como são realizados os processos da metodologia *FMEA-FUZZY*.

Suponha que a falha de causa 72 (“meio ambiente animal”) ocorreu em um determinado transformador da concessionária em estudo em janeiro de 2008. Considere também que a meta mensal da ANEEL para o DIC seja 1320 minutos e para o FIC 20 ocorrências. A potência nominal do equipamento é 150 kVA, o DIC ocorrido foi de 792 minutos e para o FIC houve 7 ocorrências.

Seguindo os passos do algoritmo da metodologia *FMEA-FUZZY* (Seção 4.3.3) tem-se:

- 1) Entre com os valores de Potência Não-Suprida (POT), FIC e DIC ocorridos no equipamento.

Tabela 5.1 – Valores de entrada.

POT (kVA)	FIC (nº de ocorrências)	DIC (minutos)
150	7	792

- 2) Calcule as percentagens dos valores de DIC e FIC em relação às suas metas.

Tabela 5.2 – Entradas FIC e DIC percentuais.

FIC (%)	DIC (%)
35	60

- 3) *Fuzzificação* das entradas - verifique para os dados de entrada quais números *fuzzy* foram “ativados”, ou seja, aqueles que possuem um grau de pertinência maior que zero.

Os parâmetros de entrada do algoritmo: POT (kVA), FIC (%) e DIC (%), referentes aos índices de Severidade, Ocorrência e Detecção, respectivamente, estão ilustrados nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3.

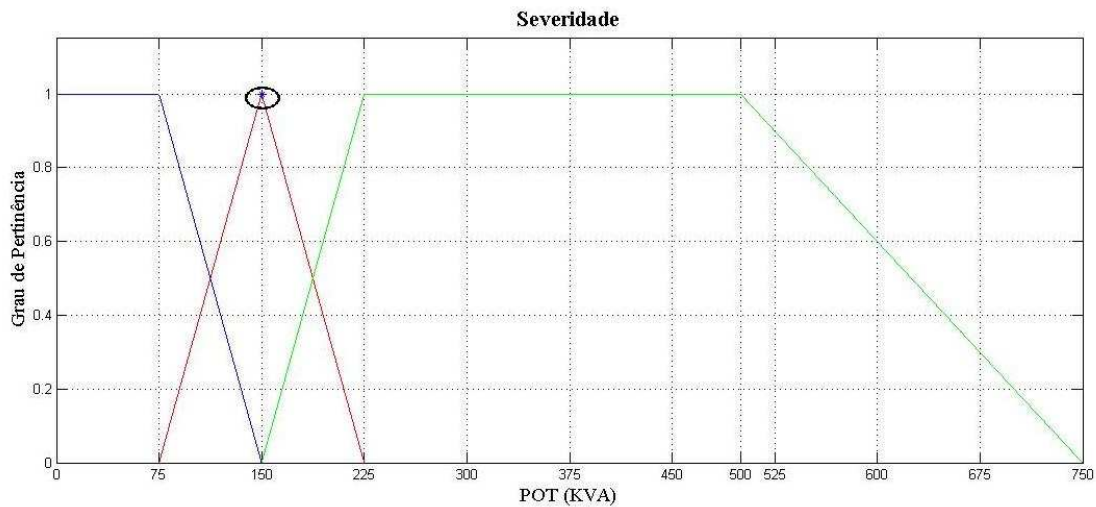


Figura 5.1 – Entrada Potência Não-Suprida para o índice Severidade

Os números *fuzzy* do eixo x na Figura 5.1 correspondem respectivamente aos valores dos intervalos definidos na Tabela 4.1 para o parâmetro Potência Não-Suprida. Pode-se observar pela figura que o número *fuzzy*⁹ 2 foi ativado com o grau de pertinência 1,0. Este número *fuzzy* corresponde ao segundo conjunto modelado para o índice Severidade ($76 \leq S \leq 150$).

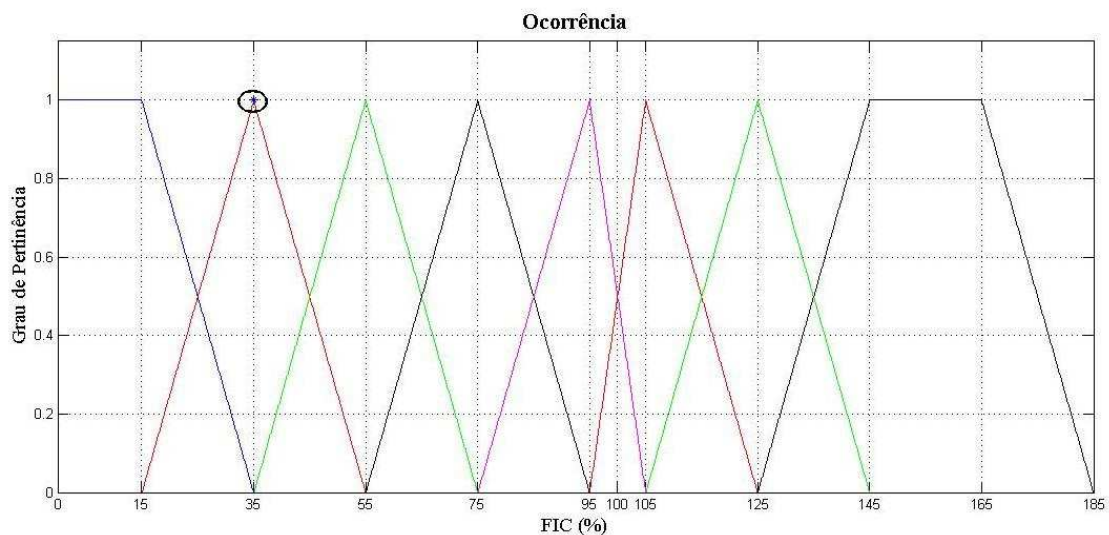


Figura 5.2 – Entrada FIC (%) para o índice Ocorrência

⁹ Na Seção 3.4 foi comentado que um conjunto *fuzzy* pode ser denominado de número *fuzzy* se o conjunto for normal e convexo. Então cada curva da função de pertinência nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 correspondem a um número *fuzzy*.

Os números *fuzzy* do eixo x na Figura 5.2 correspondem respectivamente aos valores dos intervalos definidos na Tabela 4.2 para o parâmetro FIC (%). Pode-se observar pela figura que o número *fuzzy* 2 foi ativado com o grau de pertinência **1,0**. Este número *fuzzy* corresponde ao segundo conjunto modelado para o índice Ocorrência ($16 \leq O \leq 35$).

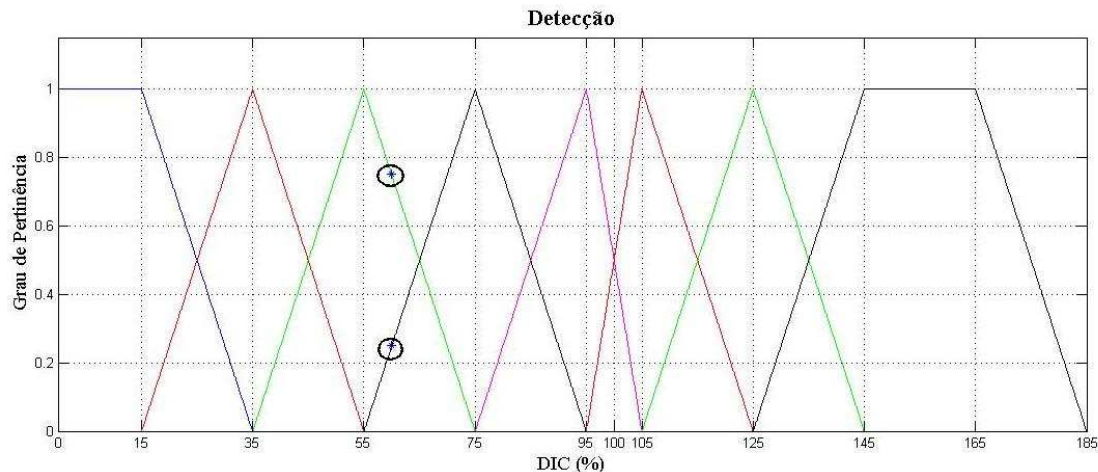


Figura 5.3 – Entrada DIC (%) para o índice Detecção

Os números *fuzzy* do eixo x na Figura 5.3 correspondem respectivamente aos valores dos intervalos definidos na Tabela 4.3 para o parâmetro DIC (%). Novamente, pode-se observar na figura que foram ativados os números *fuzzy* 3, com grau de pertinência **0,75**, e 4, com grau de pertinência **0,25**. Estes números *fuzzy* correspondem ao terceiro e quarto conjuntos, respectivamente, modelado para o índice Detecção ($36 \leq D \leq 55$; $56 \leq D \leq 75$).

- 4) Obter o produto RPN_{fuzzy} para todos os números *fuzzy* “ativados” e *desfuzzificá-lo* identificando o par [risco; grau de pertinência].

Os pares [risco, grau de pertinência] encontrados para cada entrada foram:

Tabela 5.3 – Par [risco, pertinência].

POT (kVA)	FIC (%)	DIC (%)
[2; 1,0]	[2; 1,0]	[3; 0,75], [4; 0,25]

Com este resultado tem-se 2^1 combinações, que correspondem a duas combinações de produtos. Essas combinações podem ser no máximo 2^3 (8) para a

modelagem desenvolvida, ou seja, se para todas as entradas forem ativados dois números *fuzzy*. As combinações estão ilustradas pela Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Combinações dos pares de [risco, pertinência] encontrados.

Combinações	Severidade	Ocorrência	Detecção
1	2	2	3
2	2	2	4

Nestas combinações, tem-se que o número *fuzzy* 2 corresponde ao intervalo *fuzzy* [1, 2, 3], o número *fuzzy* 3 ao intervalo *fuzzy* [2, 3, 4] e o número *fuzzy* 4 ao intervalo *fuzzy* [3, 4, 5]. Com isso, tem-se como resultado, para cada combinação, um índice RPN_i que é expresso pela Equação (5.1).

$$RPN_i = S_i \times O_i \times D_i \quad (5.1)$$

Para realizar essa multiplicação *fuzzy* é utilizado o conceito de conjuntos α -cut (Seção 3.3.3), pois a multiplicação entre dois números *fuzzy* triangulares não gera como resultado um número *fuzzy* triangular. Para realizar essa multiplicação são utilizados apenas o primeiro e o último valor do intervalo, ou seja, limite inferior e limite superior, respectivamente, do número *fuzzy*. A partir dos pontos gerados na multiplicação *fuzzy*, para todo valor α no intervalo [0, 1], pode-se encontrar a função de pertinência do risco (RPN). Assim para a primeira combinação tem-se:

$$RPN_1 = 2 \times 2 \times 3 = [1, 2, 3] \times [1, 2, 3] \times [2, 3, 4] \quad (5.2)$$

Antes de realizar a multiplicação, propriamente dita, esses números *fuzzy* foram transformados em intervalos α -cut. O processo de transformação gera números *desfuzzificados*, ou seja, números reais. A Equação que realiza essa transformação é expressa por (5.4).

$$A = [x_1, x_2, x_3] \quad (5.3)$$

$$A^\alpha = [(x_2 - x_1)\alpha + x_1, -(x_3 - x_2)\alpha + x_3] \quad (5.4)$$

$$A^\alpha = \left[(x_1^\alpha, x_3^\alpha) \forall \alpha \in [0, 1] \mid x_1, x_3, x_1^{(\alpha)}, x_3^{(\alpha)} \in \Re \right] \quad (5.5)$$

A transformação dos números *fuzzy* 2 e 3 em intervalo α -cut, respectivamente, é expressa pelas Equações (5.6) e (5.7).

$$A_1^\alpha = A_2^\alpha = [(2-1)\alpha + 1, -(3-2)\alpha + 3] = [\alpha + 1, 3 - \alpha] \quad (5.6)$$

$$A_3^\alpha = [(3-2)\alpha + 2, -(4-3)\alpha + 4] = [\alpha + 2, 4 - \alpha] \quad (5.7)$$

O cálculo do índice RPN_1 é expresso pelas Equações (5.8) e (5.9).

$$RPN_1 = A_1^\alpha \times A_2^\alpha \times A_3^\alpha \quad (5.8)$$

$$RPN_1 = [(\alpha + 1), (3 - \alpha)] \times [(\alpha + 1), (3 - \alpha)] \times [(\alpha + 2), (4 - \alpha)] \quad (5.9)$$

Com isso, tem-se que o risco *desfuzzificado* para a primeira combinação é expresso por (5.10).

$$RPN_1 = [(\alpha^3 + 4\alpha^2 + 5\alpha + 2), (-\alpha^3 + 10\alpha^2 - 33\alpha + 36)] \quad (5.10)$$

O grau de pertinência (Equação (5.11)) para o risco da primeira combinação foi encontrado por meio do critério de mínimo de acordo com o Princípio de Extensão de Zadeh (Seção 3.2).

$$\mu_{RPN_1} = \min(1, 0; 1, 0; 0, 75) = 0, 75 \quad (5.11)$$

O valor do índice RPN_1 *desfuzzificado*, para o grau de pertinência 0,75, é apresentado na Tabela 5.5. Para encontrar os limites do intervalo α -cut foi substituído o valor $\alpha = 0,75$ na Equação (5.9).

Tabela 5.5 – Limites do intervalo para o risco da primeira combinação.

Limite inferior	Limite superior
8,42	16,45

Utiliza-se o critério de mínimo dos máximos (ROSS, 2004) para encontrar o menor risco possível do suporte¹⁰ da função de pertinência do índice RPN. Então:

¹⁰

O suporte corresponde à região do universo sobre a qual a função de pertinência não é nula.

$$RPN_1 = \min(8,42;16,45) = 8,42 \quad (5.12)$$

$$RPN_1 = 8,42 \text{ com } \mu_{RPN_1} = 0,75 \quad (5.13)$$

Para a segunda combinação são realizados os mesmos procedimentos utilizados para o cálculo do índice RPN_1 , conforme apresentados na sequência.

A transformação para o número *fuzzy* 2 é semelhante à Equação (5.6). A transformação do número *fuzzy* 4 é expressa pela Equação (5.14).

$$A_3^\alpha = [(4-3)\alpha + 3, -(5-4)\alpha + 5] = [\alpha + 3, 5 - \alpha] \quad (5.14)$$

O cálculo do índice RPN_2 é expresso pela Equação (5.15).

$$RPN_2 = [(\alpha + 1), (3 - \alpha)] \times [(\alpha + 1), (3 - \alpha)] \times [(\alpha + 3), (5 - \alpha)] \quad (5.15)$$

Com isso, tem-se que o risco *desfuzzificado* para a segunda combinação é fornecido pela Equação (5.16).

$$RPN_2 = \left[(\alpha^3 + 5\alpha^2 + 7\alpha + 3), (-\alpha^3 + 11\alpha^2 - 39\alpha + 45) \right] \quad (5.16)$$

O grau de pertinência para o risco da segunda combinação é encontrado de modo semelhante ao caso da primeira combinação, ou seja, por meio do critério de mínimo de acordo com a Equação (5.17).

$$\mu_{RPN_2} = \min(1,0; 1,0; 0,25) = 0,25 \quad (5.17)$$

Assim, o valor do índice RPN_2 *desfuzzificado* é apresentado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Limites do intervalo para o risco da segunda combinação.

Limite inferior	Limite superior
5,08	35,92

Após encontrar os limites do intervalo do risco, aplica-se novamente o critério de mínimo dos máximos (ROSS, 2004) para encontrar o menor risco do suporte da função de pertinência do índice RPN para a segunda combinação. Então:

$$RPN_2 = \min(5,08; 35,92) = 5,08 \quad (5.18)$$

$$RPN_2 = 5,08 \text{ com } \mu_{RPN_2} = 0,25 \quad (5.19)$$

5) Encontre o risco máximo.

Para encontrar o risco máximo utiliza-se o critério de máximo dos mínimos dos riscos parciais encontrados nas duas combinações. Assim tem-se:

$$RPN_{final} = \max(RPN_1; RPN_2) = \max(8,42; 5,08) = 8,42 \quad (5.20)$$

$$RPN_{final} = 8,42 \text{ com } \mu_{RPN} = 0,75 \quad (5.21)$$

A Figura 5.4 ilustra a função do risco resultante estimado para a causa 72 do exemplo. A curva da função de pertinência gerada para o risco foi obtida ponto a ponto pelos conjuntos de intervalos α -cut, ou seja, os valores de α que correspondem aos valores dos graus de pertinência aplicados na Equação (5.4).

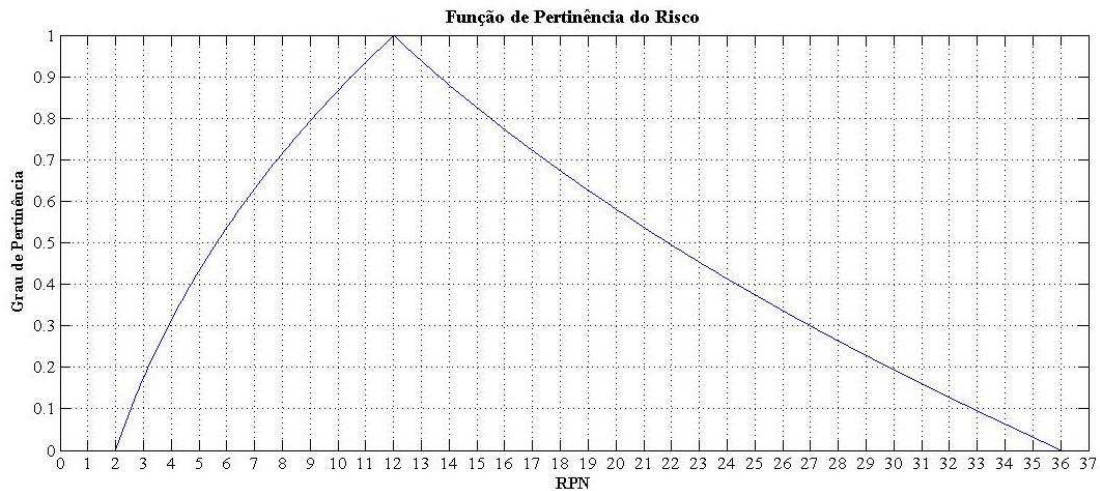


Figura 5.4 – Função de Pertinência do Risco Resultante

O próximo passo do algoritmo *FMEA-FUZZY* consiste em fazer o mesmo procedimento para todas as falhas de um equipamento selecionado de um determinado bairro e, em seguida, para todos os equipamentos do conjunto sob análise. O passo final seria realizar uma ordenação por falhas e/ou por equipamentos, para determinar quais são os equipamentos em situação mais crítica em termos de priorização da manutenção. Neste caso ilustrativo, esse passo não será mostrado.

Deste modo, determina-se um risco de 8,42 com grau de pertinência de 0,75 para a falha de causa 72. O risco máximo modelado para o sistema de distribuição compreende o intervalo [1, 192] do suporte da sua função de pertinência. O limite superior (192) desse intervalo é estimado pelo produto do número de conjuntos modelados para cada índice (Severidade, Ocorrência e Detecção) de acordo com a Equação (5.22). Então, o risco resultante estimado no exemplo corresponde a 4,38 % do valor do risco máximo.

$$RPN_{\max i} = S_i \times O_i \times D_i = 3 \times 8 \times 8 = 192 \quad (5.22)$$

Na seqüência é apresentado o estudo de caso para aplicação da metodologia desenvolvida.

5.4. Estudo de Caso

Para a aplicação da metodologia desenvolvida, foi selecionado um determinado bairro de uma cidade brasileira, o qual foi analisado durante um período de quatro trimestres do ano de 2006. Escolheu-se o período trimestral para realizar o estudo por fornecer uma visão mais ampla da gestão da hierarquização das falhas, pois se observou que uma análise utilizando o período mensal tornaria a análise muito extensa para esse estudo. Poderia também ser utilizado o período anual para análise do estudo. Os dados utilizados foram descritos na Seção 5.2.

Como foi citado na Seção 5.1, na análise para gestão dos indicadores, por meio da estimativa de risco, utiliza-se os modos de falhas agrupados nos transformadores de distribuição. O bairro possui cerca de 313 transformadores para atender os consumidores da região, nos quais 44 transformadores correspondem a equipamentos particulares. A análise contemplou os transformadores com consumidores comerciais correspondendo a 23 equipamentos. Nesse caso, todos os consumidores conectados a esses equipamentos têm o DIC e o FIC monitorados.

Este estudo de caso foi dividido em quatro partes:

- Uma visão em nível de Modo de Falha (Visão Micro) por equipamento, que é a proposta principal da metodologia, na qual o gestor tem acesso ao risco causado por cada tipo de falha em cada equipamento e com isso, obtendo o valor total do risco por equipamento.
- A segunda parte do estudo diz respeito à classificação e posterior hierarquização entre equipamentos (Visão Macro), de forma a obter uma visão mais abrangente do desempenho de cada equipamento em relação ao total de falhas ocorridas.
- A terceira parte do estudo de caso é semelhante à segunda, difere apenas em relação aos valores de DIC e FIC utilizados. Os dados ocorridos no período fornecidos pela concessionária atendem, quase sempre, as metas estipuladas pela ANEEL de forma que há poucas violações das mesmas, gerando classificações muito próximas e/ou iguais. Então, para obter um resultado mais expressivo e para validar a metodologia, novos dados foram simulados para um cenário mais adverso.
- A última parte do estudo ilustra uma comparação do resultado do terceiro caso utilizando a metodologia *FMEA-FUZZY* e a metodologia FMEA clássica.

Nas quatro análises realizadas foram utilizadas metas trimestrais, estabelecidas pela ANEEL, correspondentes a 1680 minutos de duração para o DIC e 24 ocorrências para o FIC.

5.4.1. Análise FMEA por Modos de Falha em uma Visão Micro por Equipamento

Nesta Seção, foi realizada uma avaliação dos vários tipos de falhas dos transformadores relativas aos dados do primeiro trimestre de 2006 do bairro analisado através do algoritmo *FMEA-FUZZY*. O objetivo aqui é apresentar o resultado no qual o gestor terá o risco de todas as falhas ocorridas em cada transformador, assim como o risco total por equipamento. É importante o gestor conhecer o risco associado a cada equipamento a fim de priorizar a manutenção para aqueles equipamentos em situação mais crítica. O resultado desta simulação está ilustrado na Tabela 5.7.

Na simulação foi calculado o índice RPN para cada falha e foi obtida sua respectiva posição na ordenação. Em seguida, para cada equipamento foi estimado o risco total. Nesse resultado, verificou-se que alguns equipamentos obtiveram o mesmo par [risco, grau de pertinência], o que se deve ao fato da concessionária atender com bastante folga as metas regulatórias de DIC e FIC. Assim, pelo fato dos valores de DIC e FIC serem muito baixos, será ativado o primeiro conjunto dos parâmetros, o qual foi representado por uma função de pertinência trapezoidal; então, em muitos casos, a pertinência será 1,0. Para não tornar extensa a ilustração desse resultado foram selecionados apenas alguns equipamentos da análise no período do primeiro trimestre de 2006, sendo que o resultado com os demais equipamentos pode ser visto no Apêndice I. A hierarquização entre os modos de falha neste período, também está ilustrada neste Apêndice.

Falhas repetidas: As falhas ocorridas nessa análise **se repetiram em vários equipamentos**, sendo mais comuns as falhas de números **79** (descrita como “a investigar”), **72** (descrita como “meio ambiente animal”), **67** (descrita como “*jamper* ou *fly-tap* partido”) e **57** (descrita como “má conexão em chave”). Isso se deve ao fato dos transformadores estarem conectados em série e provavelmente estarem ligados aos mesmos equipamentos de proteção. Conseqüentemente, na ocorrência de uma falha, abriu-se o disjuntor na subestação e todos os transformadores que estavam conectados no mesmo alimentador sofreram a mesma falha e obtiveram os mesmos valores de DIC e FIC para cada falha na maioria dos casos. Isso pode ser observado nos equipamentos **72248** e **71969**, os quais obtiveram o mesmo conjunto de falhas e os valores de mesma magnitude de DIC e FIC para as falhas de números (**72**) e (**67**). Estes dois equipamentos empataram na primeira posição da ordenação; em seguida outros equipamentos empataram: **72895** e **72882** na sexta posição; e **72843** e **71315** na sétima posição.

Tabela 5.7 – Análise dos modos de falha por equipamento e o risco total associado.

Equip.	Causa	POT (kVA)	FIC (%)	DIC (%)	Risco da Falha	Grau de Pertinência	Risco Total
72248	72	750	4,17	1,49	3,0000	1,0000	9,0000
	67	750	4,17	0,48	3,0000	1,0000	
	79	750	4,17	8,93	3,0000	1,0000	
71969	72	2437	4,17	1,49	3,0000	1,0000	9,0000
	67	2437	4,17	0,48	3,0000	1,0000	
	79	2437	4,17	9,35	3,0000	1,0000	
73081	78	75	4,17	131,43	3,0745	0,6785	7,0745
	72	75	4,17	1,49	1,0000	1,0000	
	81	75	4,17	2,98	1,0000	1,0000	
	67	75	4,17	0,48	1,0000	1,0000	
	79	75	4,17	8,93	1,0000	1,0000	
72143	72	150	4,17	1,49	2,0000	1,0000	6,0000
	67	150	4,17	0,48	2,0000	1,0000	
	79	150	4,17	9,35	2,0000	1,0000	
73100	57	75	4,17	3,57	1,0000	1,0000	4,0000
	72	75	4,17	5,95	1,0000	1,0000	
	70	75	4,17	4,4	1,0000	1,0000	
	79	75	4,17	5,36	1,0000	1,0000	
72144	79	45	8,33	34,53	1,8847	0,9765	3,8847
	72	45	4,17	1,49	1,0000	1,0000	
	67	45	4,17	0,48	1,0000	1,0000	
72895	57	75	4,17	3,57	1,0000	1,0000	3,0000
	72	75	4,17	5,93	1,0000	1,0000	
	79	75	4,17	5,36	1,0000	1,0000	
72882	72	75	4,17	1,49	1,0000	1,0000	3,0000
	67	75	4,17	0,48	1,0000	1,0000	
	79	75	4,17	8,93	1,0000	1,0000	
72843	57	112	4,17	3,57	0,3634	0,4933	1,0902
	72	112	4,17	7,62	0,3634	0,4933	
	79	112	4,17	5,36	0,3634	0,4933	
71315	72	112	4,17	1,49	0,3634	0,4933	1,0902
	67	112	4,17	0,48	0,3634	0,4933	
	79	112	4,17	5,36	0,3634	0,4933	

Duas falhas ocorridas nos equipamentos **73081** e **72144** merecem destaque, pois no primeiro devido à causa de falha número **78** (descrita “como outros componentes”) foi gerado um DIC (%) de **131,43%**, ultrapassando a respectiva meta em **31,43%**. Conseqüentemente, essa falha foi a que gerou o maior risco no transformador **73081**, correspondendo a **43,45%** do risco total do equipamento, que foi **7,0745**. No transformador **72144**, a falha de causa número **79** ocasionou o maior valor de FIC (%) correspondendo a **8,33%** e o segundo maior valor de DIC (%) correspondeu a **34,53%**.

5.4.2. Análise de FMEA por Equipamento em uma Visão Macro

Nesta análise foi realizado um estudo para estimar o risco total de todos os equipamentos. Optou-se fazer essa análise para sintetizar os resultados obtidos no estudo anterior e para realizar uma ordenação do risco total associado a cada equipamento, o que permite uma hierarquização entre equipamentos, independente dos modos de falha. Foram utilizados dados reais relativos às entradas POT (kVA), que corresponde à Potência Não-Suprida, FIC (%) e DIC (%). Como citado anteriormente, a análise foi realizada por trimestres, sendo cada trimestre representado em uma tabela específica para se visualizar melhor os dados e os resultados. O resultado do risco estimado foi ordenado por trimestre, seguidos de acordo com o par [risco, grau de pertinência].

No primeiro trimestre (Tabela 5.8) na maioria dos empates dos pares [risco, grau de pertinência], a pertinência obteve grau 1,0, isto ocorreu devido à utilização da função trapezoidal e porque os parâmetros de S, O e D (POT (kVA), FIC (%) e DIC (%)) foram ou de pequena magnitude ou parâmetros de grande magnitude (transformadores com Potência Não-Suprida alta). Estes fatos fizeram com que 10 equipamentos dos 22 analisados ocupassem a mesma posição na ordenação. Uma solução possível para esse problema, por meio de novas pesquisas, seria adicionar um ou mais graus de escala para o índice Severidade de forma a se obter uma maior sensibilidade dos valores.

Constata-se ainda que o transformador **73081** obteve os maiores valores DIC (%) e FIC (%) dentre os equipamentos afetados no primeiro trimestre. O DIC extrapolou sua meta em **45%** tendo como causa principal a falha de número (**78**) na Tabela 5.7. Diante

dessa evidência o equipamento **73081** também se torna um possível candidato ao direcionamento da manutenção preventiva pelo gestor, caso não tenha sido apenas um evento isolado.

Tabela 5.8 – Análise de uma visão macro por equipamento Trimestre_1.

Equipamento	POT (kVA)	FIC %	DIC %	Risco total	Grau de Pertinência
71314	225	13	13	9,0000	1,0000
71316	225	13	15	9,0000	1,0000
71439	225	13	15	9,0000	1,0000
71969	2437 ¹¹	13	11	9,0000	1,0000
72084	500	13	11	9,0000	1,0000
72101	500	13	15	9,0000	1,0000
72248	750	13	11	9,0000	1,0000
72878	500	13	15	9,0000	1,0000
73168	500	13	15	9,0000	1,0000
73081	75	21	145	7,0745	0,6785
72020	150	13	15	6,0000	1,0000
72143	150	13	11	6,0000	1,0000
73100	75	17	19	4,0000	1,0000
72144	45	17	36	3,8847	0,9765
71800	75	13	15	3,0000	1,0000
72571	75	13	15	3,0000	1,0000
72879	30	13	13	3,0000	1,0000
72882	75	13	11	3,0000	1,0000
72895	75	13	13	3,0000	1,0000
72222	112	17	19	1,4535	0,4933
71315	112	13	11	1,0902	0,4933
72843	112	13	17	1,0902	0,4933

Outro equipamento que também merece atenção especial é o **71969**, devido à alta potência fornecida, a qual pode implicar em deixar muitos consumidores sem energia, podendo interromper algum processo de fabricação ou atividade de comércio causando, por exemplo, danos a mercadorias que necessitam de resfriamento. Esse equipamento pertence a uma subestação privada, por isso possui um valor de potência maior que os valores de potência dos transformadores de distribuição.

¹¹ Valores de potência acima de 750 kVA não se referem aos valores praticados em sistemas de distribuição, ou seja, se referem aos valores de potência de equipamentos particulares.

No segundo trimestre (Tabela 5.9) apenas 10 transformadores sofreram ocorrências de falhas dentre os 23 analisados. O transformador **73168** obteve o maior risco dentre os outros. Pode-se observar que foram muito baixos os valores de magnitude de DIC (%) e FIC (%) em relação à meta trimestral desses indicadores. Os empates nos pares [risco, pertinência], quando ocorrem, significam que os efeitos dos modos de falha realmente têm impactos semelhantes e que não há preferência em relação a priorizar as ações de manutenção entre eles.

Tabela 5.9 – Análise de uma visão macro por equipamento Trimestre_2.

Equipamento	POT (kVA)	FIC %	DIC %	Risco total	Grau de Pertinência
73168	500	4	16	2,5058	0,9255
71969	2437	4	17	2,4128	0,9105
72084	500	4	17	2,4128	0,9105
72248	750	4	17	2,4128	0,9105
73100	75	8	7	2,0000	1,0000
72143	150	4	17	1,5838	0,9105
72882	75	4	17	0,7548	0,9105
73081	75	4	17	0,7548	0,9105
72144	45	4	17	0,7535	0,9100
71315	112	4	17	0,3634	0,4933

No terceiro trimestre (Tabela 5.10) ocorreu empate entre os equipamentos **71439**, **72101** e **73286** na primeira posição da ordenação. Nesse trimestre houve um maior número de empates do par [risco, grau de pertinência] dos transformadores analisados, pois ocorreram muitas falhas com os mesmos valores de DIC (%) e FIC (%). Novamente ocorre a situação em que, ao abrir o disjuntor na subestação, vários transformadores são desligados no mesmo período para os mesmos modos de falhas. Os valores ocorridos dos indicadores também foram os mais baixos dentre os outros trimestres.

É interessante observar que o transformador **73286** só sofreu ocorrência de falhas nesse trimestre, sendo afetado pelas causas de falha números **69** (descrita como “defeito em isolador”) e **3** (descrita como “Manutenção Preventiva”). O maior valor de DIC (%) ocorrido foi de **32%** (**73100** e **72222**), já o maior valor de FIC (%) foi **17%** em relação a suas metas, os quais são valores muito bons (pequenos).

Tabela 5.10 – Análise de uma visão macro por equipamento Trimestre_3.

Equipamento	POT (kVA)	FIC %	DIC %	Risco total	Grau de Pertinência
71439	225	13	7	9,0000	1,0000
72101	500	13	7	9,0000	1,0000
73286	225	13	7	9,0000	1,0000
71314	225	8	5	6,0000	1,0000
71316	225	8	4	6,0000	1,0000
71969	2437	8	3	6,0000	1,0000
72084	500	8	3	6,0000	1,0000
72878	500	8	4	6,0000	1,0000
73168	500	8	4	6,0000	1,0000
72020	150	8	4	4,0000	1,0000
72143	150	8	3	4,0000	1,0000
73100	75	17	32	3,3785	0,5020
72571	75	13	9	3,0000	1,0000
72222	112	17	32	2,1902	0,4933
71800	75	8	4	2,0000	1,0000
72144	45	8	3	2,0000	1,0000
72248	750	8	3	2,0000	1,0000
72879	30	8	5	2,0000	1,0000
72882	75	8	3	2,0000	1,0000
72895	75	8	5	2,0000	1,0000
73081	75	8	3	2,0000	1,0000
71315	112	8	3	0,7267	0,4933
72843	112	8	4	0,7267	0,4933

No quarto trimestre (Tabela 5.11) o maior valor de DIC (%) ocorrido foi de apenas **16%**. Assim como nos trimestres analisados anteriormente ocorreram alguns empates entre os pares [risco, grau de pertinência], por motivos também já explicados.

Dentre os trimestres analisados, nessa Seção, o trimestre 3 foi o que apresentou menores valores em relação aos valores DIC (%) e FIC (%) das falhas ocorridas. Também foi o período em que todos os transformadores do conjunto analisado foram afetados por algum modo de falha. De modo geral, em todos os trimestres os dados de duração e frequência das falhas dos equipamentos foram muito parecidos, pelo fato dos mesmos modos de falha terem afetado vários equipamentos ao mesmo tempo, o que pode caracterizar que esses equipamentos estejam ligados em série.

Tabela 5.11 – Análise de uma visão macro por equipamento Trimestre_4.

Equipamento	POT (kVA)	FIC %	DIC %	Risco total	Grau de Pertinência
71969	2437	4,17	0,83	9,0000	1,0000
72248	750	4,17	0,83	9,0000	1,0000
72020	150	4,17	13,81	4,0000	1,0000
72084	500	4,17	0,83	3,0000	1,0000
72143	150	4,17	0,83	3,0000	1,0000
72144	45	4,17	0,83	3,0000	1,0000
72878	500	4,17	13,81	3,0000	1,0000
72882	75	4,17	0,83	3,0000	1,0000
73081	75	4,17	0,83	3,0000	1,0000
73168	500	4,17	2,38	3,0000	1,0000
72101	500	4,17	16,01	2,6591	0,9495
71315	112	4,17	0,83	1,0901	0,4933
71800	75	4,17	15,12	0,9821	0,9940

Os resultados acima destacam que valores muito baixos dos parâmetros correspondem a riscos também muito pequenos. Primordialmente o objetivo é analisar os valores mais altos desses indicadores decorrentes de falhas mais severas, para prevenir que os mesmos não extrapolem as metas estabelecidas.

O gestor também pode observar ao longo dos trimestres os transformadores que sofreram maior número de ocorrências de falhas e analisar o risco associado (ou suas consequências). Por exemplo, dentre os 23 equipamentos apenas 8 foram afetados nos 4 trimestres por ocorrências de falhas.

5.4.3. Análise de Falhas Total por Equipamentos com Dados Simulados

Com o objetivo de analisar o risco total dos equipamentos em situação de modos de falha mais críticos, simulou-se um cenário com níveis de falhas mais adversas. Os dados foram gerados de forma aleatória na ferramenta EXCEL¹² (versão 2003) com uma distribuição normal entre os valores nas faixas modeladas na Seção 4.3.1 para DIC (%) e

¹² Foi utilizado a função ALEATÓRIO() que retorna um número aleatório maior ou igual a 0 e menor que 1 distribuído igualmente. Para gerar um número real aleatório entre a e b, use ALEATÓRIO()*(b-a)+a.

FIC (%). Consideraram-se os mesmos equipamentos e seus respectivos valores de potência em kVA para os 3º e 4º trimestres.

Nos resultados do terceiro trimestre (Tabela 5.12) observou-se que a metodologia apresentou uma ordenação adequada, pois apesar de se ter valores de risco próximos não houve empate do par [risco, grau de pertinência]. Assim, em cenários mais adversos a metodologia fornece bons resultados, uma vez que, o objetivo é ordenar os equipamentos mais críticos de forma a auxiliar a gestão da manutenção de equipamentos.

Tabela 5.12 – Visão macro do risco total por equipamento com falhas mais críticas, Trimestre_3 Simulado.

Equipamento	POT (kVA)	FIC (%)	DIC (%)	Risco	Grau de Pertinência
73168	500	69	94	47,3991	0,7111
72878	500	81	86	42,0313	0,2870
72084	500	72	79	40,4498	0,8005
72248	750	57	91	38,4677	0,8239
73286	225	56	55	26,2695	0,9727
72101	500	57	62	20,0974	0,1000
72222	112	67	66	18,2229	0,4933
72843	112	58	92	16,7296	0,4933
72143	150	63	68	16,4977	0,4148
71439	225	50	46	16,4316	0,5423
72020	150	57	57	16,0354	0,9029
73100	75	94	79	14,6850	0,8037
71316	225	49	40	12,1947	0,6879
71314	225	41	44	12,0925	0,2953
71969	2437	41	39	10,5293	0,1918
72895	75	88	83	9,5797	0,5833
71315	112	51	54	9,2831	0,4933
72571	75	86	68	9,08250	0,5596
72882	75	82	73	9,04439	0,6711
73081	75	75	67	7,9984	0,6128
72144	45	60	74	7,8900	0,7602
72879	30	64	81	5,2365	0,4420
71800	75	42	50	2,73151	0,6344

Os maiores valores de DIC (%) e FIC (%) ficaram bem próximos à meta, ambos com o valor de **94%**. O maior risco encontrado foi de aproximadamente **47,4**, um valor de risco significativo, pois corresponde a **24%** do risco máximo de **192**.

De acordo com os resultados encontrados no quarto trimestre (Tabela 5.13) os equipamentos **72084**, **72101**, **72248** e **72878** merecem atenção especial, pois atingiram o risco máximo. Com certeza esses equipamentos serão os mais priorizados para a manutenção preventiva. Nesses quatro equipamentos ocorreu o mesmo par [risco, grau de pertinência] em virtude de ter sido ativado o último conjunto nos três índices (Severidade, Ocorrência e Detecção) que compõe o índice RPN, no qual possui função de pertinência trapezoidal. Os parâmetros desses índices se encontram na faixa do intervalo em que o grau de pertinência é igual a 1,0 (ver Figuras 4.1, 4.2 e 4.3). O segundo maior valor de risco estimado foi de aproximadamente **95** que corresponde a **49,5%** do risco máximo de RPN.

Tabela 5.13 – Visão macro do risco total por equipamento com falhas mais críticas, Trimestre_4 Simulado.

Equipamento	POT (kVA)	FIC (%)	DIC (%)	Risco	Grau de Pertinência
72084	500	167	296	192,0000	1,0000
72101	500	500	186	192,0000	1,0000
72248	750	167	444	192,0000	1,0000
72878	500	500	216	192,0000	1,0000
71314	112	167	99	95,3043	0,3915
72143	150	167	96	71,1750	0,8620
72882	75	167	106	44,0218	0,9348
72020	150	250	62	33,8488	0,3655
72144	45	167	80	21,6651	0,7465
71800	75	500	85	17,6468	0,5193
73081	75	167	66	13,9550	0,5259
71969	2437	167	903	12,5165	0,4807
73168	500	500	1.250	8,7669	0,4741

Nesse resultado houve muitos equipamentos com valores de meta DIC e FIC violados, sendo o valor máximo de DIC (%) **1.250%** e de FIC (%) de **500%**.

5.4.4. Estudo Comparativo entre as Metodologias FMEA Clássica e FMEA-FUZZY

Para essa análise, escolheu-se o terceiro trimestre simulado na Seção 5.4.3, pois contempla todos os equipamentos considerados no estudo de caso. O objetivo é realizar um estudo comparativo entre as metodologias FMEA clássica e *FMEA-FUZZY*.

Na análise com a metodologia FMEA clássica, para estimar o índice RPN, foram gerados dados para os parâmetros de entrada de acordo com as Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3. Para cada faixa de valores foi atribuído um grau numérico para classificá-las de acordo com as variáveis lingüísticas atribuídas. Então, foram multiplicados os valores desses graus em relação aos valores dos parâmetros da Tabela 5.12 (valores do Trimestre_3) para cada um dos índices S, O e D. A Tabela 5.14 ilustra o resultado do risco estimado para cada equipamento nas duas metodologias.

O resultado do estudo comparativo em relação a ordenação dos equipamentos nas duas metodologias FMEA clássica e *FMEA-FUZZY* pode ser verificado na Tabela 5.15.

Observa-se que o equipamento 73168 na FMEA clássica ocupou a quarta posição na ordenação, porém na *FMEA-FUZZY* o mesmo equipamento ocupou a primeira posição. Isto mostra uma falha na priorização na manutenção do equipamento pela FMEA clássica.

Na Tabela 5.14 o campo *FMEA-FUZZY* ilustra duas informações ao usuário: risco e grau de pertinência, na qual a informação da pertinência colabora para análise do resultado em caso de valor de risco repetido.

Tabela 5.14 – Resultado do risco para as metodologias FMEA clássica e FMEA-FUZZY no Trimestre_3 Simulado.

Equipamento	FMEA Clássica	FMEA-FUZZY	
	Risco	Risco	Grau de Pertinência
72878	75	42,0313	0,287
73168	60	47,3991	0,7111
72248	60	38,4678	0,8239
72084	60	40,4499	0,8005
72101	48	20,0974	0,1000
72843	40	16,7297	0,4933
73286	36	26,2696	0,9727
72222	32	18,223	0,4933
72143	32	16,4978	0,4148
72020	32	16,0354	0,9029
71969	27	10,5294	0,1918
71439	27	16,4316	0,5423
71316	27	12,1948	0,6879
71314	27	12,0926	0,2953
73100	25	14,6851	0,8037
72895	25	9,57973	0,5833
72882	20	9,0444	0,6711
72879	20	5,23653	0,442
72571	20	9,08251	0,5596
71315	18	9,28317	0,4933
73081	16	7,99846	0,6128
72144	16	7,89004	0,7602
71800	9	2,73151	0,6344

Pode-se observar nos resultados da Tabela 5.15 que para o caso da metodologia FMEA clássica houve vários empates na classificação entre os transformadores analisados. Já para a metodologia proposta *FMEA-FUZZY* não ocorreram resultados idênticos de risco, pois a lógica *fuzzy* modela adequadamente a incerteza de cada parâmetro S, O e D.

Tabela 5.15 – Comparação da ordenação com as metodologias FMEA clássica e FMEA-FUZZY.

Ordenação	FMEA Clássica		FMEA-FUZZY		
	Equipamento	Risco	Equipamento	Risco	Pertinência
1	72878	75	73168	47,3991	0,7111
2	72084	60	72878	42,0313	0,287
3	72248	60	72084	40,4499	0,8005
4	73168	60	72248	38,4678	0,8239
5	72101	48	73286	26,2696	0,9727
6	72843	40	72101	20,0974	0,0963
7	73286	36	72222	18,223	0,4933
8	72020	32	72843	16,7297	0,4933
9	72143	32	72143	16,4978	0,4148
10	72222	32	71439	16,4316	0,5423
11	71314	27	72020	16,0354	0,9029
12	71316	27	73100	14,6851	0,8037
13	71439	27	71316	12,1948	0,6879
14	71969	27	71314	12,0926	0,2953
15	72895	25	71969	10,5294	0,1918
16	73100	25	72895	9,57973	0,5833
17	72571	20	71315	9,28317	0,4933
18	72879	20	72571	9,08251	0,5596
19	72882	20	72882	9,0444	0,6711
20	71315	18	73081	7,99846	0,6128
21	72144	16	72144	7,89004	0,7602
22	73081	16	72879	5,23653	0,442
23	71800	9	71800	2,73151	0,6344

É interessante notar que a ordenação dos equipamentos foi diferente para as duas metodologias, na qual apenas os transformadores **72143**, **72882**, **72144** e **71800** permaneceram nas mesmas posições de classificação: 9, 19, 21 e 23, respectivamente. Outro fator interessante é que os valores absolutos dos riscos para o mesmo equipamento nos dois casos foi diferente. No caso da metodologia FMEA clássica os valores de risco encontrados foram maiores que na metodologia *FMEA-FUZZY*, o que se deve ao fato de na a lógica *fuzzy* agregar graus de pertinência aos valores de entrada (de acordo com o Princípio de Extensão de Zadeh (Seção 3.2)).

5.5. Considerações Finais

Neste capítulo foi realizado um estudo de caso com quatro visões diferentes para validar a metodologia proposta *FMEA-FUZZY*. A primeira parte do estudo utilizou como exemplo o período de um trimestre baseado nos dados reais de uma concessionária brasileira para se estimar o risco ao sistema devido aos vários modos de falhas ocorridos em transformadores de distribuição. O risco foi estimado em uma visão micro, ou seja, a análise foi realizada por tipo de falhas para cada transformador.

Na segunda parte do estudo, o risco foi estimado em uma visão macro por equipamento e os equipamentos foram classificados em função do risco. Os resultados para valores muito baixos também ocasionaram empates de ordenação em virtude dos valores ocorridos serem muito baixos e a meta dos indicadores ser relaxada. Observou-se também, muitos valores de DIC e FIC iguais em equipamentos diferentes, explicado pela possibilidade dos equipamentos estarem ligados em série, na qual uma falha pode desligar vários componentes ao mesmo tempo e ocasionar mesmas durações e mesma frequência.

Na terceira parte do estudo foi utilizado um exemplo no qual foram gerados dados de forma aleatória em relação aos dados reais, para obter uma distribuição mais uniforme dos valores em relação às várias faixas modeladas dos conjuntos dos parâmetros no Capítulo 4. A metodologia se mostrou eficaz em relação aos resultados, gerando uma ordenação de prioridade de manutenção coerente.

Na última parte foi realizado um estudo comparativo entre as metodologias FMEA clássica e *FMEA-FUZZY*, com o objetivo de verificar a vantagem da última em relação à primeira. Na FMEA clássica ocorreram muitos empates de ordenação no resultado, já na metodologia *FMEA-FUZZY* foi verificada uma maior sensibilidade em relação aos efeitos dos vários modos de falha. Este fato auxilia na gestão da manutenção de forma pró-ativa em relação às ações a serem planejadas pelos Centros de Manutenção da Distribuição.

Finalmente para um direcionamento ótimo da manutenção, além dos valores de ordenação na classificação também podem ser levados em consideração os equipamentos que mais falharam ao longo do período, se há algum consumidor com necessidade especial ou contrato especial ao qual deva ser dada maior prioridade, se houve ou não extrapolação dos indicadores de continuidade em relação as suas metas, etc. Pode-se ainda levar em consideração outro tipo de análise em relação ao valor total do risco, a qual pode ser efetuada para cada modo de falha, somando-se seus riscos no período analisado, conforme apresentado no Apêndice I.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as considerações finais sobre os assuntos abordados no escopo desta dissertação, ressaltando as peculiaridades da metodologia desenvolvida para o gerenciamento de indicadores individuais de continuidade em sistemas de distribuição. Também são apresentadas algumas sugestões de pesquisa que podem ser mais amplamente exploradas, a partir das contribuições desta pesquisa.

6.1. Conclusões

Nesta dissertação foi abordado o problema relacionado à continuidade no fornecimento de energia elétrica pela concessionária aos consumidores por meio dos indicadores individuais de energia. A qualidade na prestação de serviços é constantemente exigida pela sociedade, e para garantir que a energia elétrica seja fornecida com qualidade aos consumidores o órgão regulador brasileiro, a ANEEL, estipulou metas às concessionárias em relação à continuidade do fornecimento de energia. Em virtude disso, torna-se necessário empregar uma metodologia de apoio à gestão desses indicadores de forma a evitar a violação da meta dos mesmos e assim proporcionar melhor qualidade no serviço prestado a esses consumidores.

A metodologia *FMEA-FUZZY* proposta foi desenvolvida com base na metodologia *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) como ferramenta de gestão para analisar os modos, causas e efeitos das falhas ocorridas em transformadores da rede de distribuição. A metodologia FMEA estima o Número de Priorização de Risco (RPN) de falhas ocorridas nos equipamentos. A metodologia desenvolvida também foi baseada na técnica de inteligência artificial lógica *fuzzy* que foi utilizada para dar suporte à metodologia FMEA em relação incerteza dos dados. A metodologia FMEA clássica é

limitada em alguns aspectos que dizem respeito a ordenação do índice RPN, sendo desta forma, proposto modificar a metodologia FMEA clássica avaliando diretamente a escala dos índices: Severidade, Ocorrência e Detecção em relação aos parâmetros do problema na continuidade do fornecimento de energia, utilizando os conceitos da lógica *fuzzy* para ajudar na tomada de decisões caracterizadas por informação imprecisa providas do RPN clássico.

Os parâmetros utilizados para modelar a metodologia foram: Potência Não-Suprida (kVA) para o índice Severidade, FIC (%) para o índice Ocorrência e DIC (%) para o índice Detecção. Esses parâmetros foram definidos em reuniões com a equipe de especialistas da concessionária, engenheiros, profissionais de ciências da computação e profissionais de estatística. O parâmetro para Severidade havia sido inicialmente modelado pela penalidade de multas devido à violação de metas, mas dadas as poucas ocorrências de falhas não houve penalidades suficientes para que tornasse possível essa modelagem. Então, utilizou-se Potência Não-Suprida como segunda opção, a qual é proporcional à energia que deixou de ser fornecida ao consumidor.

No Capítulo 5 foi realizado um estudo de caso com quatro abordagens diferentes para testar o comportamento da metodologia proposta *FMEA-FUZZY*. Na primeira parte do estudo foi utilizado como exemplo o período de um trimestre, baseado em dados reais de um bairro de uma cidade brasileira, para se estimar o risco para cada falha ocorrida em transformadores de distribuição. O risco foi estimado em uma visão micro, ou seja, para cada modo de falha em relação aos transformadores.

Na segunda parte do estudo foi realizada uma estimação do risco com uma visão total das falhas em cada equipamento, possibilitando uma comparação e uma ordenação entre todos os equipamentos analisados no período. Observou-se que havia vários valores idênticos de frequência e duração de falhas em equipamentos diferentes, que podem ter ocorrido em virtude de mesmas ocorrências de falhas afetarem vários equipamentos conectados em série. Nos resultados encontrados ainda se verificou empate de ordenação dos equipamentos, em virtude dos valores ocorridos serem muito baixos e a concessionária atender a meta dos indicadores com folga.

Na terceira parte do estudo foi realizada uma simulação de ocorrências de falhas (DIC e FIC) na qual foram gerados dados de forma aleatória em relação aos dados reais para obter um conjunto de valores de continuidade mais adversos. A metodologia apresentou resultados adequados, gerando uma ordenação de prioridade de manutenção condizente.

Na última parte do estudo de caso foi realizado uma comparação entre as metodologias: FMEA clássica e *FMEA-FUZZY*, com o objetivo de verificar a vantagem dessa última em relação à primeira. A metodologia *FMEA-FUZZY* se mostrou bem satisfatória em relação à ordenação dos equipamentos, na qual foi verificada a sensibilidade na classificação dos mesmos para direcionamento da manutenção de acordo com severidade e abrangência de cada modo de falha. Por outro lado, o resultado obtido com a metodologia FMEA clássica causou imprecisão em relação à ordenação e imprecisão dos equipamentos mais críticos para priorização de manutenção. Para o direcionamento ótimo de recursos para manutenção também pode ser levado em consideração os equipamentos que mais sofreram ocorrências de falhas ao longo dos trimestres, se há algum consumidor com necessidade especial ou se o contrato é do tipo especial.

Por fim, a metodologia atendeu os objetivos principais dessa dissertação: avaliou o comportamento dos indicadores individuais de continuidade DIC e FIC devido a ocorrências de vários modos de falhas, analisou o impacto das falhas a esses indicadores e realizou uma priorização dessas falhas e dos equipamentos para dar suporte à decisão do gestor com o fim de aperfeiçoar o emprego de recursos para a manutenção do sistema.

Finalmente, de acordo com o que foi apresentado na metodologia proposta, a metodologia FMEA clássica mostrou-se flexível para trabalhar em conjunto com a lógica *fuzzy*, pois gerou melhores resultados do índice RPN em relação à incerteza do risco.

6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Algumas propostas de trabalhos para pesquisas futuras em relação aos tópicos estudados nesta dissertação podem ser:

- Analisar o desempenho de alimentadores através de *FMEA-FUZZY*;
- Realizar estudos para otimizar a manutenção preventiva de subestações e alimentadores;
- Agregar outras ferramentas de apoio à decisão à metodologia *FMEA-FUZZY*;
- Realizar análises para outros tipos de consumidores levando em consideração suas peculiaridades, tais como tipo de contrato e necessidades especiais;
- Modelar como parâmetro para o índice Severidade uma relação entre penalidade de violação de meta de continuidade e Potência Não-Suprida, por exemplo;
- Aplicar a metodologia *FMEA-FUZZY* em ações tomadas dentro de uma empresa.

I. APÊNDICE – RESULTADOS

I.1. Resultado Completo da Primeira Parte do Estudo de Caso

A Tabela I.1 apresenta o resultado completo da estimação de risco para a primeira parte do estudo de caso na Seção 5.4.1.

Tabela I.1 – Análise dos modos de falha por equipamento (Visão Micro).

Equipamento	Causa	POT	FIC (%)	DIC (%)	Risco	Pertinência	Risco Total
73168	57	500	4,17	3,57	3	1	9,00
	72	500	4,17	5,95	3	1	
	79	500	4,17	5,36	3	1	
72878	57	500	4,17	3,57	3	1	9,00
	72	500	4,17	5,95	3	1	
	79	500	4,17	5,36	3	1	
72248	72	750	4,17	1,49	3	1	9,00
	67	750	4,17	0,48	3	1	
	79	750	4,17	8,93	3	1	
72101	57	500	4,17	3,57	3	1	9,00
	72	500	4,17	5,95	3	1	
	79	500	4,17	5,36	3	1	
72084	72	500	4,17	1,49	3	1	9,00
	67	500	4,17	0,48	3	1	
	79	500	4,17	8,93	3	1	
71969	72	2437	4,17	1,49	3	1	9,00
	67	2437	4,17	0,48	3	1	
	79	2437	4,17	9,35	3	1	
71439	57	225	4,17	3,57	3	1	9,00
	72	225	4,17	5,95	3	1	
	79	225	4,17	5,36	3	1	
71316	57	225	4,17	3,57	3	1	9,00
	72	225	4,17	5,95	3	1	
	79	225	4,17	5,36	3	1	
71314	57	225	4,17	3,57	3	1	9,00
	72	225	4,17	3,93	3	1	
	79	225	4,17	5,36	3	1	
73081	78	75	4,17	131,43	4,43	0,8	8,43
	72	75	4,17	1,49	1	1	
	81	75	4,17	2,98	1	1	

	67	75	4,17	0,48	1	1	
	79	75	4,17	8,93	1	1	
72143	72	150	4,17	1,49	2	1	6,00
	67	150	4,17	0,48	2	1	
	79	150	4,17	9,35	2	1	
72020	57	150	4,17	3,57	2	1	6,00
	72	150	4,17	5,95	2	1	
	79	150	4,17	5,36	2	1	
73100	57	75	4,17	3,57	1	1	4,00
	72	75	4,17	5,95	1	1	
	70	75	4,17	4,4	1	1	
	79	75	4,17	5,36	1	1	
72144	79	45	8,33	34,53	1,81	0,96	3,81
	72	45	4,17	1,49	1	1	
	67	45	4,17	0,48	1	1	
72895	57	75	4,17	3,57	1	1	3,00
	72	75	4,17	5,93	1	1	
	79	75	4,17	5,36	1	1	
72882	72	75	4,17	1,49	1	1	3,00
	67	75	4,17	0,48	1	1	
	79	75	4,17	8,93	1	1	
72879	57	30	4,17	3,57	1	1	3,00
	72	30	4,17	5,93	1	1	
	79	30	4,17	5,36	1	1	
72571	57	75	4,17	3,57	1	1	3,00
	72	75	4,17	5,95	1	1	
	79	75	4,17	5,36	1	1	
71800	57	75	4,17	3,57	1	1	3,00
	72	75	4,17	5,95	1	1	
	79	75	4,17	5,36	1	1	
72843	57	112	4,17	3,57	0,36	0,49	1,44
	72	112	4,17	7,62	0,36	0,49	
	79	112	4,17	5,36	0,36	0,49	
72222	57	112	4,17	3,57	0,36	0,49	1,44
	72	112	4,17	5,95	0,36	0,49	
	70	112	4,17	4,4	0,36	0,49	
	79	112	4,17	5,36	0,36	0,49	
71315	72	112	4,17	1,49	0,36	0,49	1,44
	67	112	4,17	0,48	0,36	0,49	
	79	112	4,17	5,36	0,36	0,49	

I.2. Risco Total por Modo de Falha

Na Tabela (I.1) pode-se observar que ocorreram 7 modos de falhas nos transformadores. Para cada modo de falha foi estimado o valor de risco, então somando-se os valores de risco para cada tipo de falha no período obtém-se o risco total por falha (Tabela I.2). Esse resultado é importante, pois também auxilia na gestão do direcionamento dos equipamentos para manutenção, uma vez que, agrega a informação em relação aos modos de falha que mais atingiram os equipamentos no período em análise. Observar que, dependendo do tipo de causa, outros equipamentos podem ser afetados, além do transformador.

Tabela I.2 – Risco total por modo de falha.

Número da Causa	Descrição da Causa	Risco	Pertinência
79	A Investigar	40,89	0,49
72	Meio Ambiente Animal	40,08	0,49
57	Má Conexão em Chave	25,72	0,49
67	<i>Jumper</i> ou <i>Fly-tap</i> Partido	14,36	0,49
78	Outros Componentes	4,43	0,8
70	Fenômeno Natural: Descarga Atmosférica	1,36	0,49
81	Ocorrências na Rede - a Especificar	1	1

Pode-se observar na tabela I.2 que nenhuma das falhas ocorridas nos equipamentos em estudo se deveu a falha no transformador.

I.3. Risco e Dados dos Parâmetros de Entrada da Seção 5.4.4

As Tabelas I.3 e I.4, ilustram os dados dos parâmetros S, D e O utilizados para estimar o índice RPN no estudo comparativo da Seção 5.4.4.

Tabela I.3 – Risco total por Equipamento.

FMEA clássica				
Equipamento	POT (kVA)	FIC (%)	DIC (%)	Risco
72878	3	5	5	75
72084	3	4	5	60
72248	3	4	5	60
73168	3	4	5	60
72101	3	4	4	48
72843	2	4	5	40
73286	3	4	3	36
72020	2	4	4	32
72143	2	4	4	32
72222	2	4	4	32
71314	3	3	3	27
71316	3	3	3	27
71439	3	3	3	27
71969	3	3	3	27
72895	1	5	5	25
73100	1	5	5	25
72571	1	5	4	20
72879	1	4	5	20
72882	1	5	4	20
71315	2	3	3	18
72144	1	4	4	16
73081	1	4	4	16
71800	1	3	3	9

Tabela I.4 – Risco total por Equipamento.

<i>FMEA-FUZZY</i>					
Equipamento	POT (kVA)	FIC (%)	DIC (%)	Risco	Pertinência
73168	500	69%	94%	47,3991	0,7111
72878	500	81%	86%	42,0313	0,287
72084	500	72%	79%	40,4499	0,8005
72248	750	57%	91%	38,4678	0,8239
73286	225	56%	55%	26,2696	0,9727
72101	500	57%	62%	20,0974	0,1000
72222	112	67%	66%	18,223	0,4933
72843	112	58%	92%	16,7297	0,4933
72143	150	63%	68%	16,4978	0,4148
71439	225	50%	46%	16,4316	0,5423
72020	150	57%	57%	16,0354	0,9029
73100	75	94%	79%	14,6851	0,8037
71316	225	49%	40%	12,1948	0,6879
71314	225	41%	44%	12,0926	0,2953
71969	2437	41%	39%	10,5294	0,1918
72895	75	88%	83%	9,57973	0,5833
71315	112	51%	54%	9,28317	0,4933
72571	75	86%	68%	9,08251	0,5596
72882	75	82%	73%	9,0444	0,6711
73081	75	75%	67%	7,99846	0,6128
72144	45	60%	74%	7,89004	0,7602
72879	30	64%	81%	5,23653	0,442
71800	75	42%	50%	2,73151	0,6344

ANEXO A: CONCEITOS E CÁLCULO DOS INDICADORES INDIVIDUAIS DE CONTINUIDADE

Conceitos básicos e cálculo a respeito dos indicadores individuais de energia elétrica, segundo resolução ANEEL N° 024, de 27 de janeiro de 2000 (ANEEL, 2004).

1) *Indicadores de Continuidade*

“Representação quantificável do desempenho de um sistema elétrico, utilizada para a mensuração da continuidade apurada e análise comparativa com os padrões estabelecidos”.

2) *Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão (DIC)*

Pode-se definir o indicador DIC como o intervalo de tempo em que, no período de observação, em uma unidade consumidora ou ponto de conexão, ocorreu descontinuidade na distribuição de energia elétrica. O seu cálculo é dado pela equação A.1:

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i) \quad (A.1)$$

3) *Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão (DMIC)*

Pode-se definir o indicador DMIC como o tempo máximo de interrupção contínua de energia elétrica em uma unidade consumidora ou ponto de conexão. O seu cálculo é dado pela equação A.2:

$$DMIC = t(i)_{\max} \quad (A.2)$$

4) *Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão (FIC)*

Pode-se definir o indicador FIC como o número de interrupções ocorridas, no período de observação, em uma unidade consumidora ou ponto de conexão. O seu cálculo é dado pela equação A.3:

$$FIC = n \quad (A.3)$$

No qual:

i = índice de interrupções da unidade consumidora ou do ponto de conexão, no período de apuração, variando de 1 a n;

n = número de interrupções da unidade consumidora ou do ponto de conexão considerada, no período de apuração;

t(i) = tempo de duração da interrupção (i) da unidade consumidora ou do ponto de conexão considerada, no período de apuração;

t(i)_{max} = valor correspondente ao tempo da máxima duração de interrupção (i), no período de apuração, verificada na unidade consumidora ou no ponto de conexão considerado, expresso em horas e centésimos de horas.

Deverão ser consideradas as interrupções com duração maior ou igual a 3 (três) minutos.

5) *Metas de Indicadores de Continuidade*

“Valores máximos estabelecidos para os indicadores de continuidade, a serem observados: mensal, trimestral e anualmente nos períodos correspondentes ao ciclo de revisão das tarifas, conforme resolução específica.”

Os indicadores de continuidade individuais (DIC e FIC) são definidos em função dos indicadores de conjunto (DEC e FEC). Caso a distribuidora viole o padrão de continuidade individual em relação ao período de apuração (mensal, trimestral ou anual), ela deverá calcular uma compensação ao consumidor e efetuar o crédito do valor na fatura de energia no mês subsequente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL - AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Legislação do Setor elétrico Brasileiro: Resoluções. Thompson, v. 2. 1330 p., 2004.

AGUIAR, H.; OLIVEIRA JUNIOR; MACHADO, A.; *et al.* Inteligência Computacional: Aplicada à Administração, Economia e Engenharia em Matlab. 1. ed.: Thomson Learning. 384 p., 2007.

ARAÚJO, W. P. P.; COELHO, J.; NASSAR, S. M.; FLORES, C.; *et. al.* Aplicação da Metodologia FMEA e Lógica Fuzzy a Indicadores de Continuidade Individuais em Sistemas de Distribuição. In: CLADE 2008 - Congreso Latinoamericano de Distribución Eléctrica. Mar Del Plata, Argentina. 2008.

AYYUB, B. M. Elicitation of Expert Opinions for Uncertainty and Risks. 1. ed.: CRC Press. 328 p., 2001.

BARBOSA JUNIOR, G. V. Aplicação de FMEA-DEA ao Sistema de Ar Condicionado da Sala de Controle de uma Usina Nuclear. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE - RJ. p. 10. 2007.

BASTANI, F. B.; CHEN, I. And TSAO, T. Reliability of Systems with Fuzzy-Failure Criterion. In: Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. p. 442-448. 1994.

BOWLES, J. B. and PELÁEZ, C. E. Application of Fuzzy Logic to Reliability engineering. In: Proceedings of the IEE, v. 83, n. 3. 1995.

BOWLES, J. B. The new SAE FMECA standard. In: *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*. p. 48 – 53. 1998.

_____. An Assessment of RPN Prioritization in a Failure Modes Effects and Criticality Analysis. In: Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. University of South Carolina. Columbia. 2003.

CHANG, C-L.; WEI, C-C. and LEE, Y-H. Failure Mode and Effects analysis using *Fuzzy* Method and Grey Theory. Journal Kybernetes, Emerald Group Publishing Limited, v. 28, n. 9, p. 1072 – 1080. 1999.

CHIN, K.-S.; CHAN, A. and YANG, J.-B. Development of a *Fuzzy* FMEA Based Product Design System. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Springer London. Volume 36, Numbers 7-8 / March, 2008. Received in 2007.

CHOI, J. H.; PARK, C. H.; CHAE, W. K. *et al.* An Improved Investment Priority Decision Method for Electrical Facilities Considering Reliability of Networks. In: Power Society General Meeting. IEEE. v. 3, p. 2185-2191. 2005.

COSTA, A. A. da. FMEA e a Fiabilidade ao nível do Projecto. Apostila (texto básico) sobre FMEA. Portugal, publicado em 24 de janeiro de 2007.

<http://smartengineering.home.sapo.pt/Fiabilidade.pdf>.

(Acessado em 14 de fevereiro de 2007).

DOD - DEPARTMENT OF DEFENSE. Military Standard Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis: MIL-STD-1629A. EUA. 1980.

http://reliafree.sourceforge.net/mildocs/mil_std_1629a.pdf.

(Acessado em 20 de maio de 2008).

DOD - DEPARTMENT OF DEFENSE. Military Handbook Reliability Prediction of Electronic Equipment: MIL-HDBK-217F. EUA. 1991.

http://assist.daps.dla.mil/docimages/A/0000/0005/3939/000000041349_000000020839_BTJRBUHXWM.PDF?CFID=24201397&CFTOKEN=ccbe32b487f91159-D7729D4B-1372-548A-D3B240C842C2DBC1&jsessionid=0630cfeaf1cd165f7592

(Acessado em 20 de maio de 2008).

DONG, W.; SHAH, H.; WONG, F. Fuzzy Computations in risk and Decision Analysis. Civ Eng. Sydt., v. 2, p. 201-208. 1985.

DUBOIS, D.; PRADE, H. Fuzzy Sets And Systems Theory and Applications. Academic Press, INC, EUA. 393 p., 1980.

GARCIA, Pauli A. de A., *Uma Abordagem Fuzzy com Envolvimento dos Dados da Análise dos Modos e Efeitos de Falha*. Tese (Doutorado) - COPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ. 2006.

GUEDES, A. R.; ANDRADE, D. N. de; CAMARGO, E. Estudo dos impactos da falta de investimento na qualidade de energia elétrica no Brasil. In: X Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, 2006.

GUIMARÃES, A. C. F.; LAPA, C. M. F. *Fuzzy Inference to Risk Assessment on Nuclear Engineering Systems*. 1. ed.: Elsevier, v. 7. p. 17-28. 2007.

HAAPANEN P.; HELMINEN A. *Failure mode and effects analysis of software-based automation systems*. In: VTT Industrial Systems. STUK-YTO-TR 190. Finland. 37 p., 2002. <http://www.fmeainfocentre.com/handbooks/softwarefmea.pdf>. (Acessado em 10 de fevereiro de 2008).

HELMAN, H.; ANDERY, P. R. P. Análise de Falhas (Aplicação dos métodos de FMEA – FTA). Fundação Christiano Ottoni, v. 11. Escola de Engenharia, UFMG. 156 p., 1995.

HOYLE, D. QS-9000 Quality Systems Handbook. Butterworth-Heinemann. 512 p., 1997.

_____. ISO 9000 Quality Systems Handbook. Butterworth Heinemann, 5.ed, 704 p. 2005.

IEC (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION). International Standard IEC- 60812: Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA). IEC. 2006.

<http://lhc-mpwg-reliability.web.cern.ch/lhc-mpwg-reliability/documentation/BMT-cei-iec-61508-7.pdf>

(Acessado em 25 de maio de 2008).

KISHK, M.; AL-HAJJ, A. A fuzzy model and algorithm to handle subjectivity in life cycle costing based decision-making. *Journal of Financial Management of Property and Construction*, 5(1-2), p. 93-104. 2000.

KLIR, G. J.; YUAN, B. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications* (Hardcover). 1. ed.: Prentice Hall PTR.592 p., 1995.

LIMA, C. J. T. de. *Processo de Tomada de Decisão em Projetos De Exploração e Produção de Petróleo no Brasil: uma Abordagem Utilizando Conjuntos Nebulosos*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio De Janeiro. Rio de Janeiro – RJ. Outubro 2003.

MACESKER, B., KUHANECK, S., MULLIGAN, M. *et al.* *Principles of Risk-based Decision Making*. 2. ed.: ABS Consulting. Tennessee, EUA. 2001.

MAZZOLA, V. B.; NASSAR, S. M.; COELHO, J. *et al.* *Gerenciamento de Indicadores de Continuidades de Fornecimento de Energia Elétrica*. In: CLADE 2008 - Congreso Latinoamericano de Distribución Eléctrica. Mar Del Plata, Argentina. 2008.

PENTTI, H. e ATTE, H. *Failure Mode and Effects Analysis of Software-Based Automation Systems*. Editora: STUK, Finland, 37 p., 2002.

<http://www.fmeainfocentre.com/handbooks/softwarefmea.pdf>

(Acessado em 10 de abril de 2008).

RAUSAND, M.; OIEN, K. *The Basic Concepts of Failure Analysis*. In: *Reliability Engineering and System Safety*. Elsevier. v. 53, n. 1, p. 73-83, July 1996.

RENTERÍA, A. R. *Estimação de Probabilidade Fuzzy a partir de Dados Imprecisos*. Tese (Doutorado)- Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Setembro 2006.

ROSS, T. J. *Fuzzy Logic for Engineering Applications*. 2 ed.: John Wiley & Sons, UK, 2004.

ROTONDARO, R. G. SFMEA: Análise do Efeito e Modo da Falha em Serviços – aplicando técnicas de prevenção na melhoria de serviços. *Revista Produção*, v. 12, n. 2, 2002.

SAE International. Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA) and Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA) and Effects Analysis for Machinery (Machinery FMEA). Automotive Quality And Process Improvement Committee. 2002.

http://www.sae.org/technical/standards/J1739_200208

(Acessado em 10/06/2007)

SHARMA, R. K.; KUMAR, D. and KUMAR, P. Systematic Failure Mode Effect Analysis (FMEA) using *Fuzzy Linguistic Modeling*. *International Journal of Quality & Reliability Management*. Emerald Group Publishing Limited, v. 22, n. 9. p. 986 – 1004. 2005.

SILVA, C. E. S.(Sanches) da; TIN, J. V.; OLIVEIRA, V. C. de. Uma Análise da Disseminação do FMEA nas Normas de: Sistema de Gestão pela Qualidade (ISO9000 e QS9000), Sistema de Gestão Ambiental (ISO14000) e Sistema de Gestão da Segurança e Saúde do Trabalho (BS8800 - futura ISO18000). In: XVII ENEGEP, 1997, Gramado. Anais do XVII ENEGEP, 1997.

SIVANANDAM, S. N.; SUMATHI, S.; DEEPA, S. N. *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*. 1. ed.: Springer. New York. 430 p., 2006.

STAMATIS, D. H. *Failure Mode and Effect Analysis from Theory to Execution*. ASQ Quality Press, (2 Rev Exp) EUA. 1995.

TOLEDO, J. C. de; AMARAL, D. C. Apostila (texto básico) sobre FMEA. GEPEQ – grupo de estudos e pesquisa em qualidade - DEP–UFSCar. Disponível em: www.gepeq.dep.ufscar.br/arquivos/FMEA-APOSTILA.pdf.

(Acessado em 18 de novembro de 2007).

VAZ, O. R.; SPERANDIO, M.; COELHO, J.; BORBA, C. M.; ROLIM, R. B. Análise de Causas de Falhas e Desempenho do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica. In: SBSE 2006 - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande-PA, IT.137, 2006.

VOLLERTT JUNIOR, J. R., Confiabilidade e Falhas de Campo: Um Estudo de Caso para a Melhoria de um Produto e do Reparo, Através de um Procedimento Sistemático de Coleta de Dados. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 1996.

WANG, Y.-M.; CHIN, K.-S.; POON, G. K. K and YANG, J.-B. Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. Expert Systems with Applications. Artigo a ser publicado, 2008.

WOLFRAM RESEARCH 2008. Fuzzy Logic. Wolfram Mathematica Documentation Center. <http://www.wolfram.com/products/applications/fuzzylogic/> (Acessado em 21/07/2008).

ZADEH, L. A.. *Fuzzy sets*. In: Information and Control 8, p. 338 – 353. 1965.

_____. This Week's Citation Classic: *Fuzzy Sets*. Number 47. 1980.

www.garfield.library.upenn.edu/classics1980/A1980KP91500001.pdf

(Acessado em 16 de julho de 08.)

_____. The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning, Part I. Elsevier: Information Sciences 8, p. 199 – 249. 1975.

ZAFIROPOULOS, E. P.; DIALYNAS, E. N. Reliability Prediction and Failures Mode Effects and Criticality Analysis (FMECA) of Electronic Devices using *Fuzzy Logic*. Emerald Group Publishing Limited. v. 22, n. 2. p. 183-200. 2005.